

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ESTUDIO DE LAS REVERBERACIONES OBSERVADAS EN LAS CUENCAS BARINAS-APURE Y MARACAIBO A PARTIR DE SÍSMICA DE GRAN ÁNGULO**

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Alonso L., Manuel A.  
Para optar al título de  
Ingeniero Geofísico.

Caracas; 2018

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ESTUDIO DE LAS REVERBERACIONES OBSERVADAS EN LAS CUENCAS BARINAS-APURE Y MARACAIBO A PARTIR DE SÍSMICA DE GRAN ÁNGULO**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Michael Schmitz

COTUTOR ACADÉMICO: Mariano Arnaiz

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Alonso L., Manuel A.  
Para optar al título de  
Ingeniero Geofísico.

Caracas; 2018

Caracas 20 de noviembre de 2018.

### CONSTANCIA DE APROBACIÓN

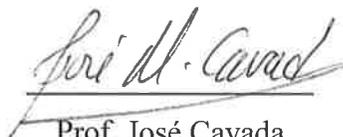
Los abajo firmantes miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Br. Manuel Alejandro Alonso Landaeta, titulado:

**“ESTUDIO DE LAS REVERBERACIONES OBSERVADAS EN LAS CUENCAS BARINAS-APURE Y MARACAIBO A PARTIR DE SÍSMICA DE GRAN ÁNGULO”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al título de Ingeniero Geofísico y, sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas del autor, lo declaran **APROBADO**.



Prof. Herbert Rendón  
Jurado



Prof. José Cavada  
Jurado



Prof. Michael Schmitz  
(Tutor Académico)

## DEDICATORIA

*A mis padres, Carmen y Manuel  
Sin ellos nunca hubiera llegado tan lejos.*

## AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradezco a Dios, por todas las fortalezas, herramientas y amistades que colocó en mi camino para que se pudiera cumplir este sueño.

Agradezco a la Universidad Central de Venezuela por permitirme estudiar en sus aulas y disfrutar esta etapa universitaria en compañía de excelentes profesores, compañeros y profesionales (y futuros profesionales). También quiero agradecer a la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) por darme la oportunidad de realizar mi Trabajo Especial de Grado en sus instalaciones.

Agradezco inmensamente a mi familia, en especial a mis padres, Carmen y Manuel, quienes han sido un gran soporte en mi vida y me han enseñado todo lo necesario para seguir adelante.

También quiero agradecer a Andreina Medina, quien siempre creyó en mí y me ha ayudado a superar cualquier obstáculo con su amor y cariño en todo momento. Además de ella, también a su familia, en especial a Claribel, Alejandro y Ramy, quienes prácticamente me adoptaron y me han brindado su apoyo desde el momento que los conocí. Gracias.

A lo largo de la carrera conocí muchas amistades con las que compartí momentos inolvidables y me acompañaron a lo largo de la carrera. Es por esto, que quiero agradecer especialmente a Jefferson Toledo, Brayner García, Carlos Flores, Greynner García, Eduardo De Nobrega y todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron a que se lograra esta meta. Además de todos los compañeros con los que compartí en el centro de estudiantes y mis compañeros de fútbol de la liga UCV.

Agradezco a todos aquellos profesores y profesionales que con gran vocación y paciencia supieron enseñarme y guiarme durante toda la carrera. Especialmente a Michael Schmitz, Mariano Arnaiz, José Cavada, Janckarlos Reyes, Jesús González, Inírida Rodríguez, Ricardo Alezones, Orlando Méndez y Keyla Ramírez.

Por último y no menos importante, agradezco a mi familia de la Urbina, en especial a Flory y Pablo, por enseñarme grandes valores de la vida y por insistirme en que presentara la prueba interna de la UCV. Sin ellos, esta etapa nunca hubiera empezado.

Alonso L., Manuel A.

**ESTUDIO DE LAS REVERBERACIONES OBSERVADAS EN  
LAS CUENCAS BARINAS-APURE Y MARACAIBO A PARTIR  
DE SÍSMICA DE GRAN ÁNGULO**

**Tutor Académico: Prof. Michael Schmitz. Cotutor Académico: Prof. Mariano  
Arnaiz. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología,  
Minas y Geofísica. Año 2018, 160 p.**

**Palabras claves:** cuencas Barinas-Apure y Maracaibo, sísmica de gran ángulo, reverberaciones, modelo 1D.

**Resumen.** Este trabajo presenta la elaboración de modelos 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a la profundidad de las cuencas Barinas–Apure y Maracaibo, mediante el análisis de las reverberaciones observadas en secciones sísmicas, utilizando datos de sísmica de gran ángulo adquiridos por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) en el proyecto de investigación “GIAME”. Para la elaboración de las secciones sísmicas se utilizó la rutina de procesamiento denominada *Seisplot*, con la que se seleccionaron las distintas reverberaciones observadas en los 9 disparos de adquisición. Mediante la elaboración de programa denominado “Ondas Sísmicas” se calcularon las velocidades aparentes de las reverberaciones observadas. Utilizando el módulo de *Sureflpsvsh* de *Seismic Un\*x* se elaboraron secciones sísmicas sintéticas que fueron comparadas con las secciones sísmicas interpretadas. Mediante estos datos se pudieron elaborar los modelos 1D mencionados anteriormente. La cuenca Barinas-Apure presentó un mayor número de reverberaciones debido a un mayor contraste de impedancia. Las velocidades aparentes de las reverberaciones en la cuenca Barinas-Apure fueron mayores que las de Maracaibo por la diferencia en las profundidades del basamento. Entre las condiciones necesarias para que se generen reverberaciones en cuencas sedimentarias están: la presencia de altos contrastes de impedancia y una o varias capas de baja velocidad. Siendo los factores las rigen: la magnitud de la fuente, la profundidad del basamento y el tipo de litología.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xvi</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	<b>xviii</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.2.1 General .....	2
1.2.2 Específico.....	2
1.3 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	3
1.4 ANTECEDENTES.....	4
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>11</b>
<b>MARCO GEOLÓGICO</b> .....	<b>11</b>
2.1 Cuenca Barinas-Apure .....	13
2.2 Cuenca de Maracaibo.....	14
2.3 Evolución Geodinámica.....	15
2.3.1 Fase pre–apertura continental durante el Paleozoico (etapa pre- <i>rift</i> )....	17
2.3.2 Apertura continental durante el Jurásico - Cretácico inferior (etapa de <i>rift</i> y deriva).....	19
2.3.3 Periodo de margen pasivo durante el Cretácico (etapa posterior a la apertura continental).....	20
2.3.4 Colisión de arco de islas contra el borde occidental de Colombia durante el Cretácico Superior - Paleoceno.....	20
2.3.5 Emplazamiento de las napas del Caribe entre el Paleoceno y el Eoceno Medio .....	21

2.3.6	Producción de un régimen de transpresión entre el Eoceno Superior - Mioceno Medio. ....	21
2.3.7	Levantamiento de los Andes de Mérida y Sierra de Perijá desde el Oligoceno al Plioceno. En el Plioceno – Pleistoceno una compresión EO refuerza el depocentro norandino con más de 30,000 pies de sedimentos.....	22
2.4	Estratigrafía de las cuencas Barinas – Apure y Maracaibo.....	23
	<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>27</b>
	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>27</b>
3.1	Estructura de la Tierra.....	27
3.2	Ondas sísmicas .....	29
3.2.1	Ondas corpóreas .....	30
3.3	Sísmica de gran ángulo .....	32
3.4	Fases sísmicas .....	33
3.5	Múltiples reflexiones o reverberaciones .....	35
3.6	Impedancia sísmica .....	37
3.7	Secciones sísmicas en tiempo reducido .....	37
3.8	Principio del método del trazado de rayo.....	38
3.9	Modelado directo .....	38
3.10	Método de modelado de reflectividades .....	39
3.11	Normalización de las trazas .....	41
3.12	Filtro.....	41
3.12.1	Filtro Butterworth .....	42
	<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>44</b>
	<b>MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>44</b>
4.1	Recopilación de información disponible.....	44
4.1.1	Información geológica y geofísica del área de estudio .....	45
4.1.2	Características de adquisición .....	45
4.1.3	Base de datos a procesar .....	46

4.2	Procesamiento .....	48
4.2.1	Configurar rutina <i>Seisplot</i> .....	49
4.2.2	Secciones sísmicas .....	50
4.2.3	Caracterización de las reverberaciones .....	54
4.2.4	Secciones sísmicas sintéticas y modelos 1D.....	56
4.3	Interpretación .....	61
4.3.1	Identificación de reverberaciones .....	61
4.3.2	Interpretación y comparación de las reverberaciones por cuenca.....	62
	<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>64</b>
	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>64</b>
5.1	Secciones sísmicas interpretadas.....	66
5.1.1	Cuenca Barinas – Apure.....	69
5.1.2	Cuenca de Maracaibo .....	79
5.2	Caracterización de las reverberaciones .....	85
5.3.1	Mapas cuantitativos de reverberaciones por cuenca .....	86
5.3.2	Tablas de velocidades aparentes de reverberaciones por segmento.....	89
5.3	Secciones sintéticas y modelos 1D .....	93
5.3.1	Cuencas Barinas – Apure .....	93
5.3.2	Cuenca de Maracaibo .....	114
5.4	Comparación de las reverberaciones observadas en cada cuenca.....	125
5.5	Condiciones que generan reverberaciones en cuencas sedimentarias.....	127
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>129</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>131</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>132</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>137</b>
	Anexo A: Secciones sísmicas sin procesar .....	138

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1. Mapa del área de estudio, indicando la ubicación de las cuencas Barinas – Apure y Maracaibo.....	3
Figura 2. Visualización 3D de oeste a este de la región de estudio. En el que se muestran: las cuencas Barinas – Apure y Maracaibo, Los Andes de Mérida, Los Andes de Orientales de Colombia, La Sierra de Perijá y Las Napas de Lara (tomado de Celis, 2017). .....	4
Figura 3. Mapa de ubicación de los perfiles y disparos sísmicos de los proyectos BOLIVAR y GEODINOS (Tomado de Schmitz <i>et al.</i> , 2008).....	5
Figura 4. Mapa de la ubicación y distribución de los perfiles y disparos sísmicos del proyecto GIAME.....	6
Figura 5. (a) Modelo gravimétrico cortical 2D en la sección sur de los Andes de Mérida. (b) Vista 3D del modelo gravimétrico.....	7
Figura 6. Secciones sísmicas del perfil Andes Central en las que se señalan las fases corticales. Rojo = Pg. Azul = Pmp. Verde = Pi. Magenta = Pn. Negro = Pslab. (a) Barinas. (b) San Silvestre. (c) Río Apure (modificado de Yegres, 2017).....	8
Figura 7. Secciones sísmicas del perfil Andes Sur, en la zona austral de los Andes de Mérida. (a) Santa Bárbara de Barinas. (b) Río Caparo. (c) Guasualito (modificado de Pinto, 2015).....	9
Figura 8. Secciones sísmicas al norte del perfil Andes Sur, en las que se señalan las fases corticales. Pg = Rojo. Pmp = Azul. (a) Santa Bárbara del Zulia. (b) El Vigía. (c) San Pedro (modificado de Montilla, 2015).....	10
Figura 9. Cuencas petrolíferas de Venezuela, basadas en la distribución de sus Provincias Sedimentarias. L.E.B. = Lineamiento de El Baúl (tomado de Yoris y Ostos, 1997). .....	11
Figura 10. Profundidad del basamento en intervalos de 5,000 pies sobre el nivel del mar y ubicación de sistemas de fallas (tomado de Feo-Codecio, <i>et al.</i> , 1984).....	12
Figura 11. Ubicación de los distintos terrenos alóctonos y autóctonos Precámbricos de Venezuela (tomado de Yoris y Ostos, 1997).....	17

Figura 12. Distribución de las rocas jurásicas en Venezuela. (1) aflorando en la Sierra de Perijá; (2) parte del basamento de la Cuenca de Maracaibo; (3) en los Andes; (4) en el subsuelo de las cuencas de Barinas- Apure y Oriental (grábenes de Apure-Mantecal y Espino) y han sido interpretadas como involucradas en profundidad en los corrimientos de la Serranía del Interior (tomado de Yoris y Ostos, 1997). .....	19
Figura 13. Marco geológico regional para la sedimentación en Venezuela Occidental (Cuencas de Maracaibo, Falcón, Barinas-Apure y Oriental-Subcuenca de Guárico) durante el Oligoceno (tomado de Yoris y Ostos, 1997).....	22
Figura 14. Variación de la velocidad de las ondas P y ondas S y densidad con la profundidad (Modificado de Shearer, 2009).....	28
Figura 15. Principio de Huygens (tomado de Telford, <i>et al.</i> , 1990) .....	30
Figura 16. Refracción y reflexión de ondas corpóreas a partir de la incidencia de una onda P sobre una interfase (modificado del Lowrie, 2007) .....	31
Figura 17. Recorrido del rayo sísmico en múltiples capas (modificado de Mussett y Khan, 2000).....	32
Figura 18. Reflexiones y refracciones críticas (modificado del Lowrie, 2007).....	33
Figura 19. Modelo de velocidad-profundidad a lo largo de un perfil de sísmico en el que se indica la trayectoria y las velocidades de los rayos sísmicos través de las principales interfases (modificado de Gohl y Uenzelmann-Neben, 2012). .....	34
Figura 20. Sección sísmica y geometría de los tipos de múltiples (modificado del Telford, <i>et al.</i> , 1990). .....	36
Figura 21. Principales grupos de rayos que son considerados para modelar los tiempos de llegadas de datos de gran ángulo (tomado de Zelt, 1999). .....	39
Figura 22. Diagrama de la forma de la función del filtro Butterworth (modificado de GEOSOFT Oasis montaj, s.f.) .....	42
Figura 23. Diagrama de trabajo del marco metodológico.....	44
Figura 24. Archivo "geometría" para la rutina <i>Seisplot</i> .....	48
Figura 25. Configuración de la rutina <i>Seisplot</i> . (a) Ventana que permite escoger el tipo de selección. (b) Ventana que permite la selección de hasta 20 múltiples. ....	50

Figura 26. Sección sísmica del disparo Barinas con una relación señal-ruido óptima para observar reverberaciones. (a) Sección sísmica sin editar. (b) Sección sísmica con los tipos de onda indicadas. Línea roja: onda directa. Línea verde: fase Pg. Línea azul: ondas superficiales. Línea naranja: reverberación asociada a la fase Pg. Línea morada: reverberación asociada al paquete sedimentario. ....	53
Figura 27. Interfaz del programa de Ondas sísmicas .....	55
Figura 28. Representación gráfica del cálculo de las velocidades aparentes de cada reverberación por cada tres puntos seleccionados ( <i>picks</i> ).....	56
Figura 29. Parte del Shell Script utilizado para el modelado 1D, utilizando el <i>software Notepad++</i> .....	59
Figura 30. Desplazamiento de múltiples y primeras llegas de ondas P–SV en un modelo estratificado de dos capas. (a) componente radial. (b) componente vertical (modificado de Ma, <i>et al.</i> , 2004).....	60
Figura 31. Ejemplo en la metodología de selección de tiempos de llegada de las reverberaciones (a) Ventana de control de selección. (b) Ondícula con acercamiento y selección señalada. (c) Sección sísmica de Barinas interpretada. ....	62
Figura 32. Comparación de las secciones sísmicas con las reverberaciones seleccionadas con respecto a las secciones sísmicas sintéticas.....	63
Figura 33. Mapa del área de estudio, señalando la ubicación de los perfiles, segmentos y disparos analizados sobre las cuencas Barinas – Apure y Maracaibo. (Mapa A) Segmento Barinas – Río Apure. (Mapa B) Segmento Santa Bárbara del Zulia – El Vigía. (Mapa C) Segmento Santa Bárbara de Barinas – Guasualito.....	65
Figura 34. Representación gráfica de la trayectoria de propagación de las múltiples reflexiones observadas en las cuencas. (a) Primera reverberación asociada al paquete sedimentario. (b) Segunda reverberación asociada al paquete sedimentario. (c) Primera reverberación asociada a la fase Pg. (d) Segunda reverberación asociada a la fase Pg. ....	67
Figura 35. Profundidades del tope del basamento pre - Cretácico en la cuenca Barinas - Apure (modificado de González, 2009).....	68

Figura 36. Sección sísmica interpretada del disparo de Barinas. Las cruces de color rojo representan las reverberaciones asociadas a la fase Pg. Las demás al paquete sedimentario. ....	70
Figura 37. Sección sísmica interpretada del disparo de San Silvestre. Las cruces de color rojo representan las reverberaciones asociadas a la fase Pg. Las demás al paquete sedimentario.....	72
Figura 38. Sección sísmica interpretada del disparo de Río Apure. Las cruces de color rojo representan las reverberaciones asociadas a la fase Pg. Las demás al paquete sedimentario. ....	74
Figura 39. Sección sísmica interpretada del disparo de Santa Bárbara de Barinas. Las cruces representan las reverberaciones asociadas al paquete sedimentario. ....	75
Figura 40. Sección sísmica interpretada del disparo de Río Caparo. Las cruces de color rojo representan las reverberaciones asociadas a la fase Pg. Las demás al paquete sedimentario.....	77
Figura 41. Sección sísmica interpretada del disparo de Guasdualito. Las cruces de color rojo representan las reverberaciones asociadas a la fase Pg. Las demás al paquete sedimentario.....	79
Figura 42. Sección sísmica interpretada del disparo de Santa Bárbara del Zulia. Las cruces representan las reverberaciones asociadas al paquete sedimentario. ....	81
Figura 43. Sección sísmica interpretada del disparo de San Pedro. Las cruces de colores representan las reverberaciones asociadas al paquete sedimentario.....	83
Figura 44. Sección sísmica interpretada del disparo de El Vigía. Las cruces de colores representan las reverberaciones asociadas al paquete sedimentario. ....	85
Figura 45. Mapa cuantitativo de las reverberaciones asociadas al paquete sedimentario observadas distribuidas en la cuenca Barinas – Apure, indicando mediante cruces (+) la ubicación de los disparos.....	87
Figura 46. Mapa cuantitativo de reverberaciones asociadas al paquete sedimentario distribuidas en la cuenca Maracaibo, indicando mediante cruces (+) la ubicación de los disparos.....	88

Figura 47. Modelo 1D general de la cuenca Barinas – Apure con respecto a la profundidad de cada capa.....	94
Figura 48. Mapa estructural del bloque de Maracaibo en el que se señala la ubicación de los disparos de adquisición estudiados para este trabajo (modificado de Arnaiz-Rodríguez y Audemard, 2014).....	95
Figura 49. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de Barinas. ....	96
Figura 50. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de Barinas. ....	98
Figura 51. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de San Silvestre. ....	99
Figura 52. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de San Silvestre. ....	101
Figura 53. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de Río Apure.....	102
Figura 54. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de Río Apure.....	104
Figura 55. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de Santa Bárbara de Barinas.....	105
Figura 56. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de Santa Bárbara de Barinas.....	107
Figura 57. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de Río Caparo. ....	108
Figura 58. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de Río Caparo. ....	110
Figura 59. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de Guasdualito. ....	111
Figura 60. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de Guasdualito. ....	113

Figura 61. Modelo 1D general de la cuenca de Maracaibo con respecto a la profundidad de cada capa.....	115
Figura 62. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de Santa Bárbara del Zulia. ....	116
Figura 63. Modelos 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de Santa Bárbara del Zulia al norte y al sur.....	118
Figura 64. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de San Pedro. ....	119
Figura 65. Modelos 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de San Pedro al norte y al sur. ....	121
Figura 66. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de El Vigía. ....	122
Figura 67. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de El Vigía. ....	124
Figura 68. Representación de la trayectoria de una reverberación simple (asociada al paquete sedimentario) a ambos lados del disparo, entre un basamento con buzamiento hacia el sur y una capa de baja velocidad sin buzamiento. Línea roja: reverberación que se propaga hacia el norte. Línea verde: reverberación que se propaga hacia el sur. Línea azul punteada: línea normal imaginaria perpendicular a la base reflectante...	126

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla 1. Columna estratigráfica de la cuenca Barinas – Apure. ....	24
Tabla 2. Columna estratigráfica de la cuenca de Maracaibo (modificado de Rivero, 2016). ....	25
Tabla 3. Detalles de adquisición de los distintos disparos de adquisición.....	46
Tabla 4. Parámetros de la rutina <i>Seisplot</i> aplicados sobre los datos .....	51
Tabla 5. Características del procesamiento del disparo de Barinas. ....	70
Tabla 6. Características del procesamiento del disparo de San Silvestre. ....	71
Tabla 7. Características del procesamiento del disparo de Río Apure.....	73
Tabla 8. Características del procesamiento del disparo de Santa Bárbara de Barinas. ....	75
Tabla 9. Características del procesamiento del disparo de Río Caparo. ....	76
Tabla 10. Características del procesamiento del disparo de Guasdualito. ....	78
Tabla 11. Características del procesamiento del disparo de Santa Bárbara del Zulia. ....	80
Tabla 12. Características del procesamiento del disparo de San Pedro. ....	82
Tabla 13. Características del procesamiento del disparo de El Vigía. ....	84
Tabla 14. Promedios de múltiples y profundidades alcanzadas por cuenca. ....	86
Tabla 15. Promedio de velocidades de reverberaciones en el segmento Barinas -Río Apure.....	89
Tabla 16. Promedio de velocidades de reverberaciones en el segmento Santa Bárbara de Barinas - Guasdualito. ....	91
Tabla 17. Promedio de velocidades de reverberaciones en el segmento Santa Bárbara del Zulia - El Vigía.....	92
Tabla 18. Valores promedio utilizados para la elaboración de los modelos 1D y las secciones sísmicas sintéticas correspondientes a la cuenca Barinas – Apure. ....	93
Tabla 19. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de Barinas.....	97
Tabla 20. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de San Silvestre.....	100

Tabla 21. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de Río Apure. ....	103
Tabla 22. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de Santa Bárbara de Barinas. ....	106
Tabla 23. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de Río Caparo. ....	109
Tabla 24. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de Guasualito. ....	112
Tabla 25. Valores promedio utilizados para la elaboración de los modelos 1D y las secciones sísmicas sintéticas correspondientes a la cuenca de Maracaibo. ....	114
Tabla 26. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de Santa Bárbara del Zulia. ....	117
Tabla 27. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de San Pedro. ....	120
Tabla 28. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de El Vigía. ....	123

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Página</b>
Anexo 1. Barinas.....	138
Anexo 2. San Silvestre.....	139
Anexo 3. Río Apure.....	139
Anexo 4. Santa Bárbara de Barinas.....	140
Anexo 5. Río Caparo.....	140
Anexo 6. Guasualito.....	141
Anexo 7. Santa Bárbara del Zulia.....	141
Anexo 8. San Pedro.....	142
Anexo 9. El Vigía.....	142

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Proyectos de investigación geocientíficos realizados en Venezuela como COLM (1984), ECOGUAY (1998), ECCO (2001), Mar y Tierra (2002), BOLIVAR y GEODINOS (2004) y GIAME (2014), han sido de vital importancia para obtener conocimientos de los rasgos estructurales y la evolución geodinámica y tectónica del país. La región noroccidental de Venezuela es un área tectónicamente compleja, donde la orogénesis de Los Andes, la expulsión del Bloque Triangular de Maracaibo, la subducción incipiente de los llanos bajo Los Andes venezolanos y la formación de las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo son algunos de los rasgos tectónicos que determinan su complejidad (Arnaiz-Rodríguez, 2009). Donde es importante mencionar que, durante el Mioceno Superior inició la formación de la cuenca Barinas-Apure y su separación de la cuenca de Maracaibo hacia el occidente (ambas cuencas de tipo antepaís), principalmente por el levantamiento de la cadena montañosa de los Andes de Mérida, y también por la expulsión hacia el norte del bloque de Maracaibo, producto de la compresión generada por la colisión (Audemard y Audemard, 2002

Mediante la sísmica de refracción de gran ángulo, se han podido realizar estudios de las estructuras presentes en la corteza, manto y el límite entre ellas a nivel mundial (Zhao, *et al.*, 2001; Mackenzie, *et al.*, 2005; Brocher, *et al.*, 1994; Makovsky *et al.*, 1996; Mjelde, *et al.*, 1998). Al utilizarse en cuencas sedimentarias, normalmente se generan múltiples reflexiones de onda en un corto periodo de tiempo entre la superficie y el basamento, donde existen numerosos contrastes de impedancia. Estas múltiples reflexiones también se le conocen como reverberaciones y normalmente son consideradas como ruido sísmico que pueden generar confusión en la etapa de

interpretación sísmica, por lo que generalmente son suprimidas en la etapa de procesamiento sísmico. Sin embargo, en la sísmica de gran ángulo de diversos proyectos de investigación como el de Geociencia Integral de los Andes de Mérida (GIAME), se ha visto que el número de reverberaciones varía entre distintas cuencas, e incluso entre distintos disparos de adquisición realizados en la misma cuenca (Schmitz, *et al.*, 2008; Montilla, 2015; Yegres, 2017), sin tener definidos cuales son las condiciones del subsuelo para que en distintas zonas de la cuenca se produzca un mayor número de estas múltiples reflexiones. En vista de lo anterior, el propósito de esta investigación es la de proponer modelos 1D de las reverberaciones observadas en las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo a partir de datos de sísmica de gran ángulo. Los resultados permitirán inferir el tipo de litología asociado a que se genere este fenómeno.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 General**

Proponer modelos 1D de las reverberaciones observadas en las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo, utilizando datos de sísmica de gran ángulo.

### **1.2.2 Específico**

- Generar secciones sísmicas con las reverberaciones sísmicas señaladas, correspondientes a los segmentos Barinas-Río Apure, Santa Bárbara de Barinas-Guasdalito y El Vigía-Santa Bárbara del Zulia.
- Caracterizar las reverberaciones observadas en las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo.
- Comparar las reverberaciones observadas en las diferentes cuencas de estudio.
- Interpretar las condiciones que puedan generar reverberaciones en cuencas sedimentarias.

### 1.3 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los datos que se analizaron para este trabajo de investigación corresponden a los adquiridos en el proyecto GIAME. Parte de este proyecto adquirió datos de sísmica de gran ángulo sobre las cuencas de estudio. La cuenca Barinas-Apure se encuentra entre las latitudes  $6^{\circ}$  y  $9^{\circ} 30'$  N y las longitudes  $67^{\circ} 15'$  y  $72^{\circ} 30'$  O. La cuenca de Maracaibo se encuentra entre las latitudes  $8^{\circ} 15'$  y  $12^{\circ}$  N y las longitudes  $70^{\circ} 30'$  y  $73^{\circ}$  O (Figura 1)

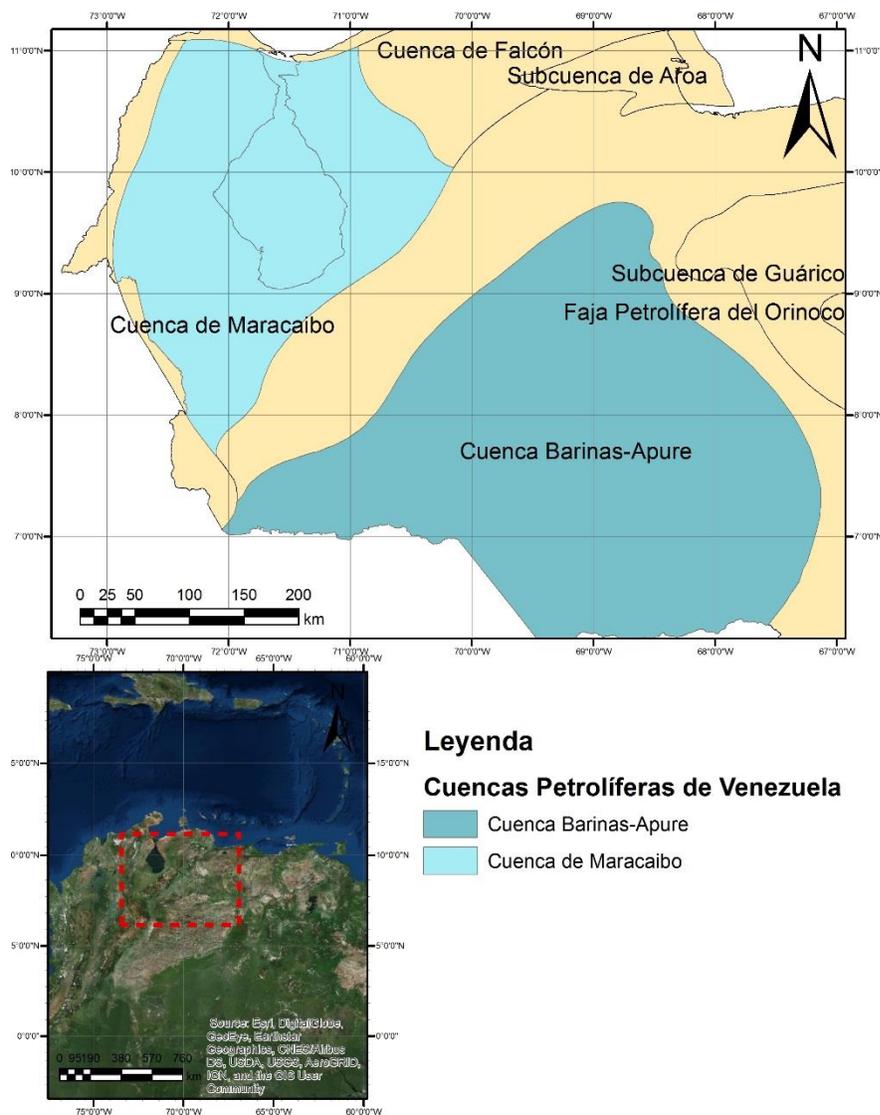


Figura 1. Mapa del área de estudio, indicando la ubicación de las cuencas Barinas – Apure y Maracaibo

En la Figura 2 se puede observar un mapa 3D de la zona de estudio, en el que se muestra parte de la topografía y variedad geomorfológica presentes en las cuencas Barinas – Apure y Maracaibo.

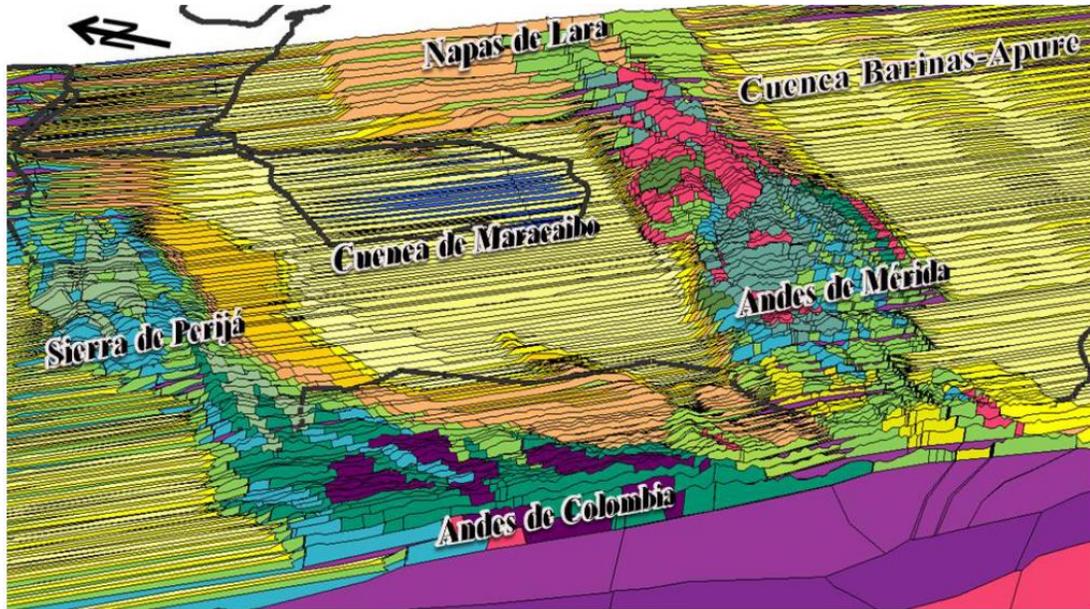


Figura 2. Visualización 3D de oeste a este de la región de estudio. En el que se muestran: las cuencas Barinas – Apure y Maracaibo, Los Andes de Mérida, Los Andes de Orientales de Colombia, La Sierra de Perijá y Las Napas de Lara (tomado de Celis, 2017).

#### 1.4 ANTECEDENTES

En Venezuela se han realizado diversos proyectos de investigación en los que se ha utilizado la sísmica de refracción profunda para poder definir y caracterizar estructuras corticales como la corteza y el manto superior. Entre los proyectos más recientes se pueden mencionar los siguientes:

El proyecto *Broadband Ocean Land Investigations of Venezuela and the Antilles Arc Region* (BOLIVAR) y el Proyecto de Geodinámica Reciente del límite Norte de la placa suramericana (GEODINOS) forman parte de una serie de estudios geológicos y geofísicos multidisciplinarios que tuvieron como objetivo principal, determinar la evolución geodinámica en la zona límite entre la placa Caribe y la placa suramericana. En el área de la sísmica activa, se realizó una campaña conjunta BOLIVAR-GEODINOS, en la que se adquirieron más de 30 líneas de reflexión 2-D

costa afuera, y 4 perfiles de refracción profunda costa afuera y en tierra (Bezada, 2005) (Figura 3). A partir de estas líneas se generaron perfiles que pudieron proporcionar información sobre la estructura cortical, desde la corteza oceánica-transicional en el borde sur de la placa del Caribe hasta la corteza continental del sistema de montañas del Caribe, además de las cuencas antepaís asociadas a esta zona, las cuales están limitadas al sur por el escudo de Guayana, que corresponde a la placa estable de Sudamérica (Schmitz, *et al.*, 2008).

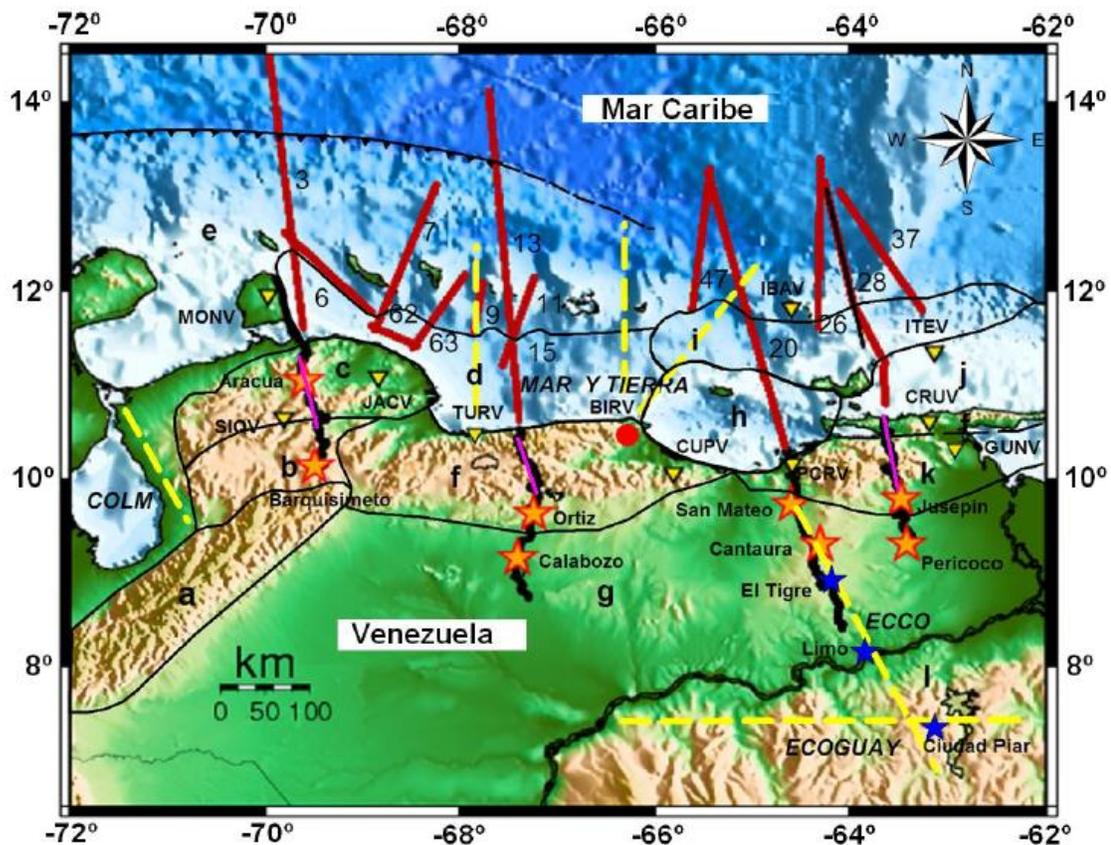


Figura 3. Mapa de ubicación de los perfiles y disparos sísmicos de los proyectos BOLIVAR y GEODINOS (Tomado de Schmitz *et al.*, 2008).

En el marco del proyecto Geociencia Integral de Los Andes de Mérida (GIAME) se desarrollaron estudios geofísicos interdisciplinarios para determinar la estructura litosférica de los Andes de Mérida, en los que se realizaron cuatro perfiles principales de sísmica de gran ángulo, ubicados en la cadena montañosa de los Andes de Mérida (Figura 4). En las cuencas sedimentarias adyacentes se realizaron mediciones de

ruido sísmico con el fin de determinar los períodos de vibración del suelo y correlacionarlos con las estructuras provenientes de la exploración petrolera (Schmitz, *et al.*, 2015).

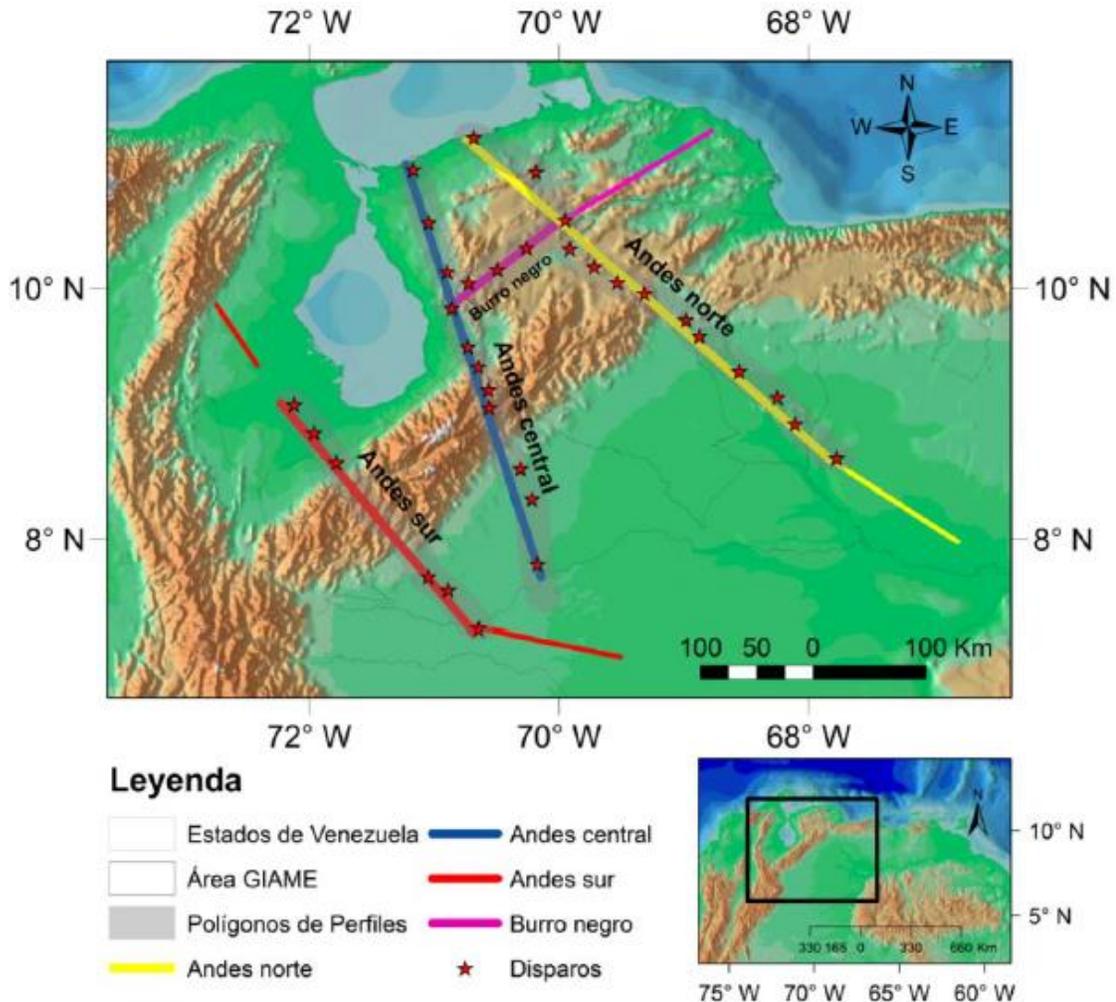


Figura 4. Mapa de la ubicación y distribución de los perfiles y disparos sísmicos del proyecto GIAME.

El alcance de este proyecto en el área de estudios sísmicos fue, definir la interacción entre las placas Caribe y Suramérica al oeste de Venezuela, relacionando las estructuras de deformación presentes en Los Andes de Mérida. Además de esto, también generar modelos de la corteza por debajo de Los Andes de Mérida (Flores, 2015). Rondón *et al.*, (2016) generaron un modelo gravimétrico cortical 2D de un perfil que cruza la sección sur de los Andes de Mérida, logrando confirmar que la

profundidad de la discontinuidad de Moho es mayor en la placa Sudamericana con respecto al Bloque de Maracaibo y la profundidad del basamento de la cuenca de Maracaibo es mayor que la del basamento de la cuenca Barinas-Apure (Figura 5).

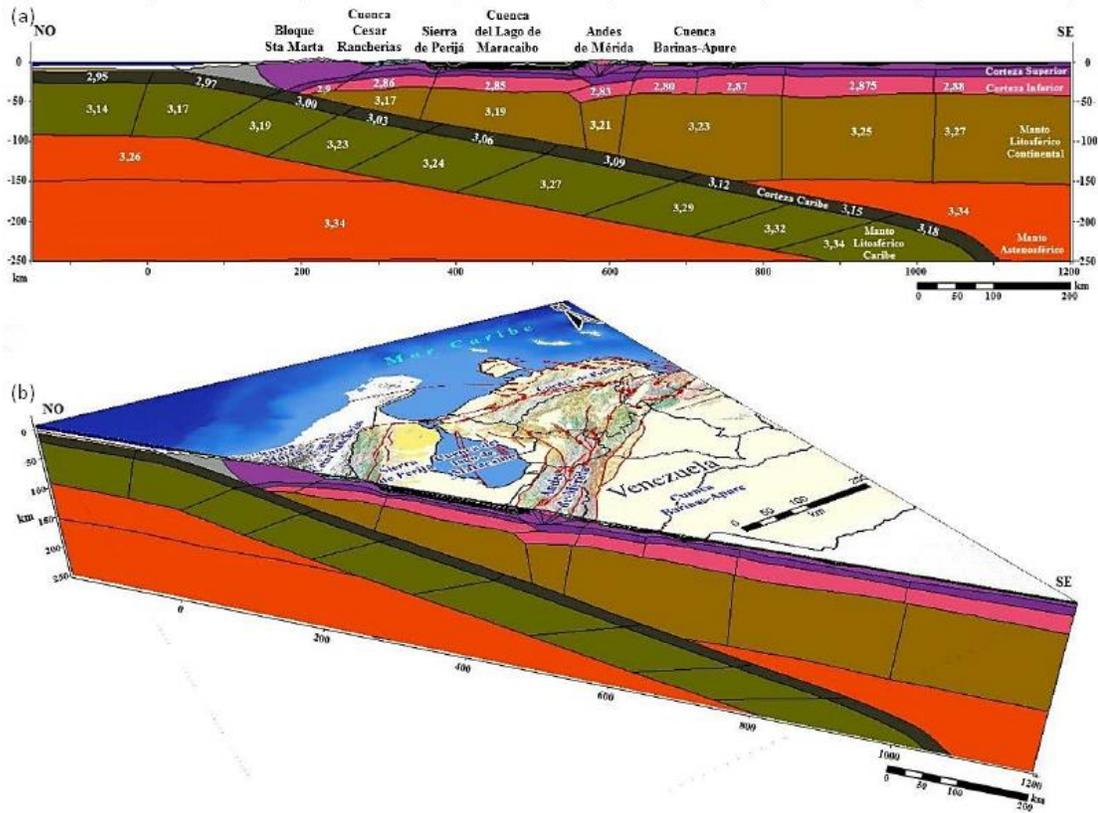


Figura 5. (a) Modelo gravimétrico cortical 2D en la sección sur de los Andes de Mérida. (b) Vista 3D del modelo gravimétrico.

También se pueden destacar trabajos previos en las secciones sísmicas que fueron analizadas para este trabajo de investigación, donde el objetivo principal era detectar las distintas fases corticales. Yegres (2017) menciona que en el sur del disparo de la sección de Barinas hay presencia de un efecto de reverberación de la energía, producido por la naturaleza de los sedimentos en la cuenca Barinas-Apure. También destaca la presencia de reverberaciones en la sección de San Silvestre, donde se aprecian hacia el norte del disparo hasta 100 Km de distancia desde la fuente, mientras que hacia el sur se identifica hasta el final de la sección a 70 Km de *offset*. Vuelve a hacer la mención en la sección de Río Apure, en la que se observan reverberaciones al norte del disparo (Figura 6).

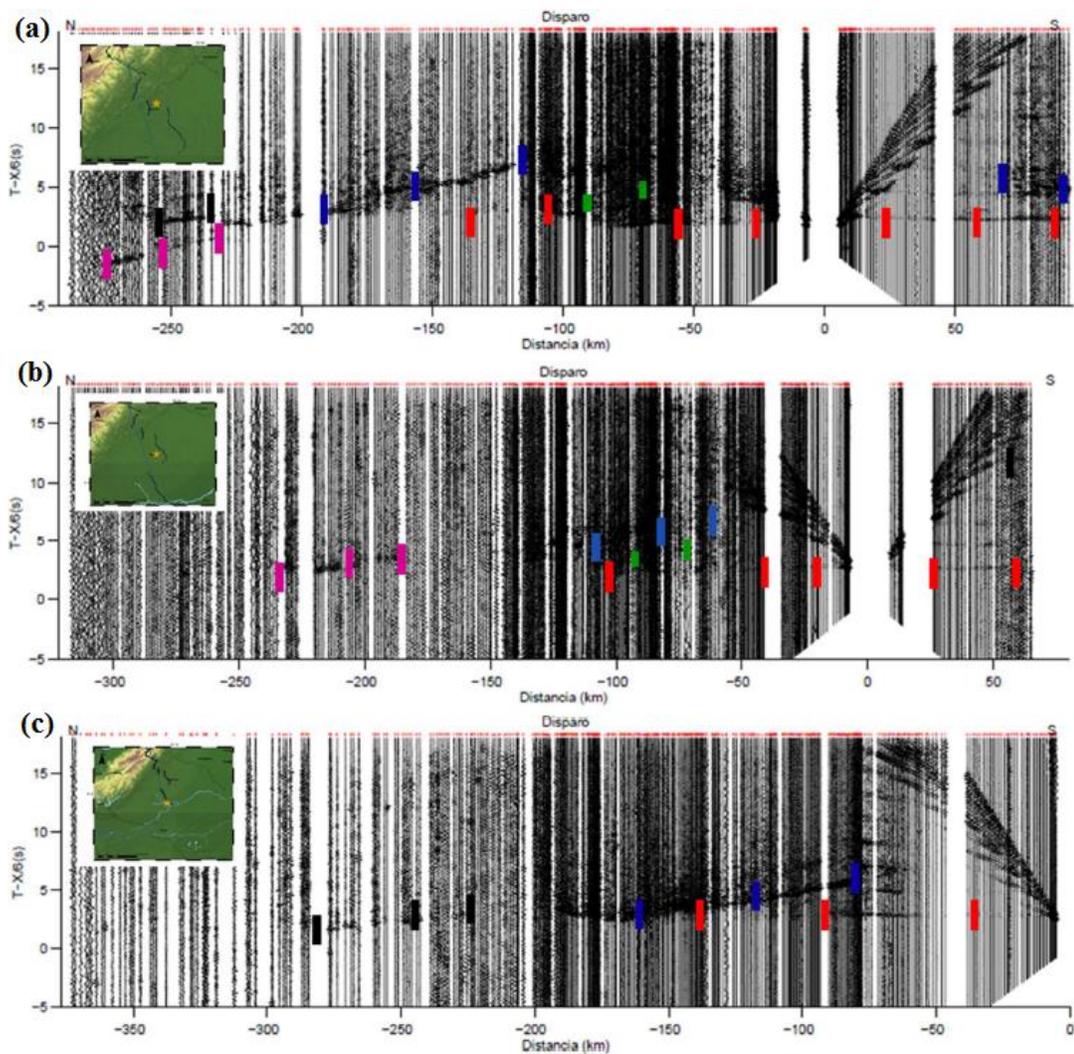


Figura 6. Secciones sísmicas del perfil Andes Central en las que se señalan las fases corticales. Rojo = Pg. Azul = Pmp. Verde = Pi. Magenta = Pn. Negro = Pslab. (a) Barinas. (b) San Silvestre. (c) Río Apure (modificado de Yegres, 2017).

Pinto (2015) generó un modelo bidimensional de velocidades de ondas en la parte austral de los andes de Mérida, donde se enfocó en la escogencia la fase Pg en las secciones sísmicas de Santa Bárbara de Barinas, Río Caparo y Guasualito. En estas se pueden destacar la presencia de reverberaciones (Figura 7).

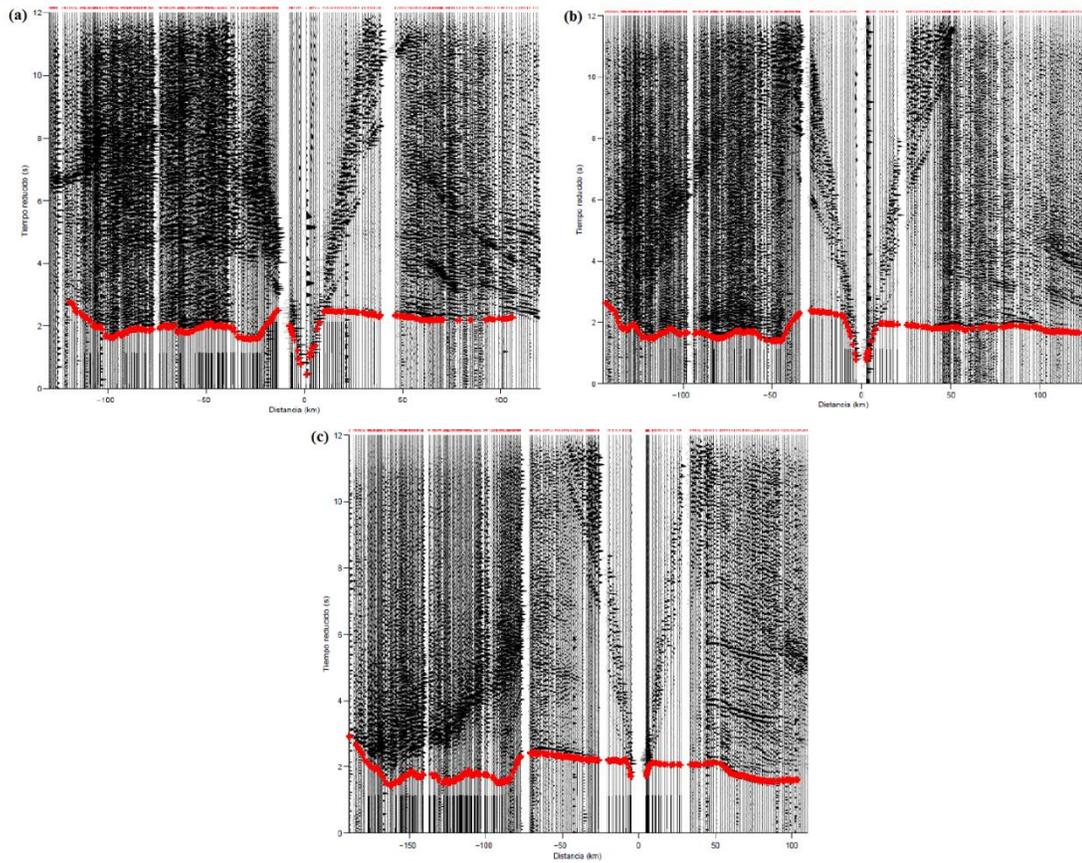


Figura 7. Secciones sísmicas del perfil Andes Sur, en la zona austral de los Andes de Mérida. (a) Santa Bárbara de Barinas. (b) Río Caparo. (c) Guasualito (modificado de Pinto, 2015).

Montilla (2015) realizó un análisis de la estructura cortical al norte del perfil Andes Sur, abarcando parte de la cuenca de Maracaibo. Entre las secciones sísmicas que analizó se detectó levemente la presencia de reverberaciones en las secciones de Santa Bárbara del Zulia, San Pedro y El Vigía (Figura 8).

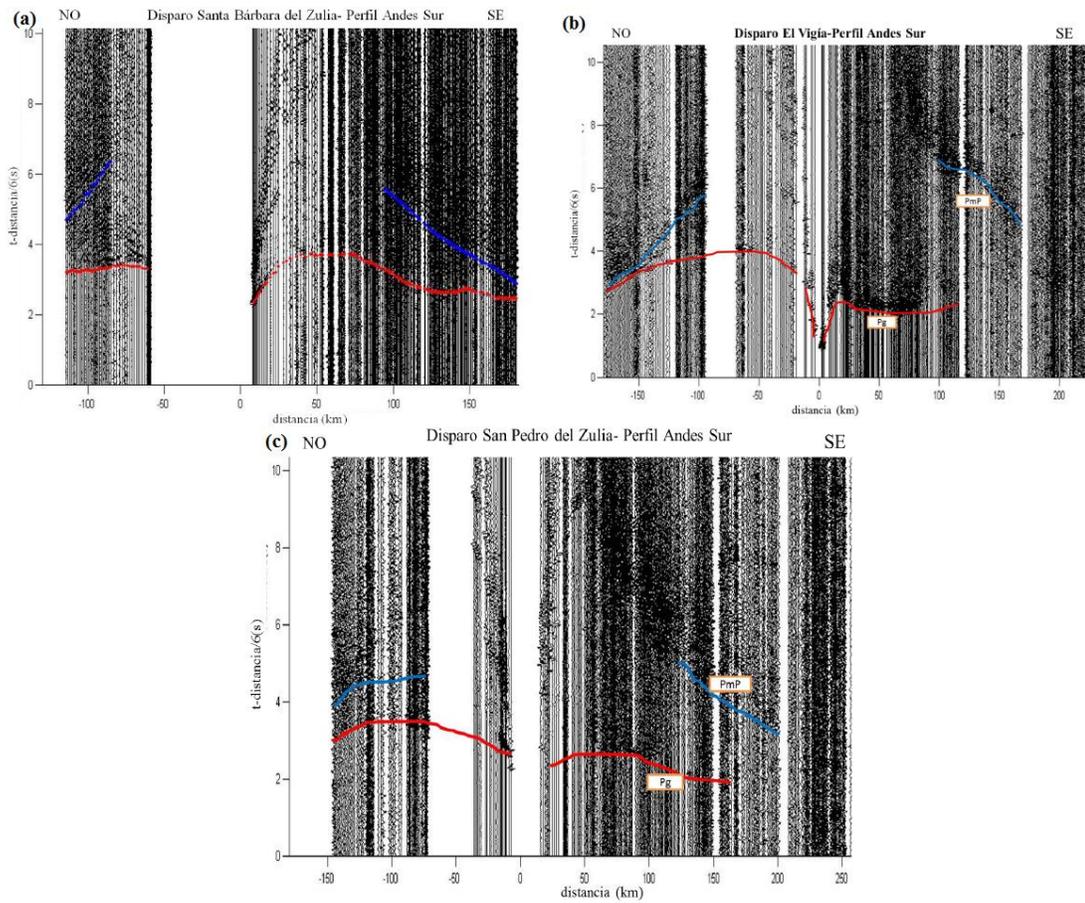


Figura 8. Secciones sísmicas al norte del perfil Andes Sur, en las que se señalan las fases corticales. Pg = Rojo. Pmp = Azul. (a) Santa Bárbara del Zulia. (b) El Vigía. (c) San Pedro (modificado de Montilla, 2015).

## CAPÍTULO II

### MARCO GEOLÓGICO

El occidente de Venezuela es un área tectónicamente compleja, en la que tiene presente un sistema en el que confluye el escape del bloque de Maracaibo limitado por sistemas de fallas transcurrentes y la orogénesis de los Andes venezolanos, que genera un sistema doble de cuencas flexurales: la cuenca Barinas-Apure al sur y la cuenca de Maracaibo al norte (Arnaiz-Rodríguez, *et al.*, 2011). Este sistema es producto de la interacción entre las placas Caribe, Sudamericana y Nazca, la cual produjo además un sistema de cadenas montañosas, como la cordillera de la costa y la Sierra de Perijá, y cuencas antepaís como las cuencas Oriental y Falcón, en la zona septentrional de Venezuela.

Para poder entender la geología de las cuencas estudiadas para este trabajo (Barinas – Apure y Maracaibo), las cuales se aprecian en la Figura 9, es necesario conocer sus rasgos estructurales y evolución estratigráfica y geodinámica.



Figura 9. Cuencas petrolíferas de Venezuela, basadas en la distribución de sus Provincias Sedimentarias. L.E.B. = Lineamiento de El Baúl (tomado de Yoris y Ostos, 1997).

Es importante mencionar que el basamento de Venezuela, que está constituido por rocas ígneo metamórficas que se clasifican en base a tres unidades geográficas: un escudo Precámbrico al sur, un cinturón intermedio que data del Paleozoico y un borde de rocas alóctonas al norte que datan del Mesozoico-Terciario (Feo-Codecio, *et al.*, 1984).

En la Figura 10 se puede apreciar la distribución de las profundidades de cada una de las cuencas cada 5,000 pies sobre el nivel del mar, y donde están indicadas algunas ciudades por abreviaturas: MA = Maracaibo, BAR = Barinas, C = Caracas, EB = El Baúl, SF = San Fernando, LM = Las Mercedes, Z = Zaraza, B = Barcelona, CB = Ciudad Bolívar, M = Maturín y T = Tucupita. Por ejemplo, para la cuenca Barinas-Apure se aprecia que las profundidades máximas del basamento se encuentran cercanas al piedemonte andino, mientras que las más someras se encuentran cerca de Caracas. En la cuenca de Maracaibo sus profundidades máximas se ubican cerca del piedemonte andino al SE, mientras que sus profundidades más someras se encuentran en su borde occidental. También se puede apreciar la ubicación de sistemas de fallas, que se mencionaran más adelante en este capítulo.

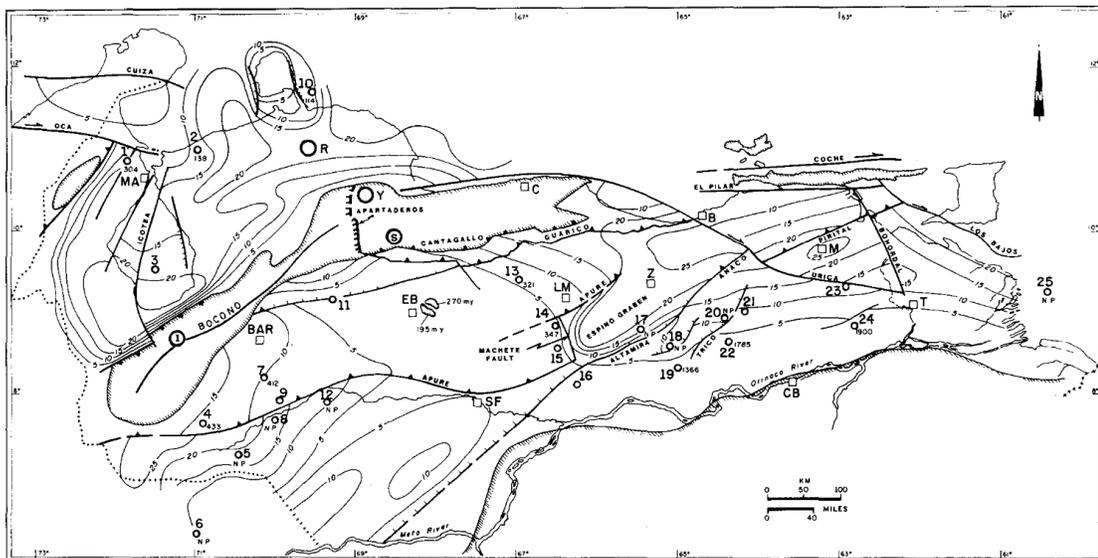


Figura 10. Profundidad del basamento en intervalos de 5,000 pies sobre el nivel del mar y ubicación de sistemas de fallas (tomado de Feo-Codecio, *et al.*, 1984)

## 2.1 Cuenca Barinas-Apure

La Cuenca Barinas-Apure es una depresión estructural localizada en la región suroccidental de Venezuela, abarcando un área aproximada de 92.000 km<sup>2</sup> y una profundidad máxima estimada de 5,34km (Chacín, *et al.*, 2005; Arnaiz-Rodríguez, *et al.*, 2011). Está limitada hacia el norte por la prolongación occidental de la Serranía del Interior Central; al NO por Los Andes de Mérida; al este y al NE por el levantamiento de El Baúl y a la antefosa andina; al sur está limitada por un alto gravimétrico entre los ríos Apure y Arauca, según lo reportaron Hosper y Van Wijen en 1959 (citados por González de Juana, *et al.*, 1980).

Es considerada una cuenca antepaís que se originó por el levantamiento de los Andes de Mérida durante el Mioceno Superior. Tiene una forma pronunciadamente asimétrica donde su flanco meridional está inclinado suavemente hacia el NO, siguiendo la pendiente del escudo de Guayana y el Arco del Baúl, y un flanco septentrional que forman parte del flanco SE de Los Andes venezolanos (González de Juana, *et al.*, 1980). Su basamento se considera de edad paleozoica y autóctono, conformado por rocas ígneo-metamórficas como granitos, sienitas, esquistos y otras rocas metamórficas que son conocidas como “capas rojas”, que indican la apertura de Gondwana y Laurasia (Feo-Codecio, *et al.*, 1984; Arnaiz, 2009).

En el subsuelo de la cuenca está presente la prolongación del Macizo de Colorado (elemento tectónico de la Cadena Andina) en dirección SE, subdividiendo la cuenca mayor en dos subcuencas: Uribante al oeste y Barinas al NE (González de Juana, *et al.*, 1980).

Según Arnaiz (2009), existe una serie de estructuras tipo graben en la cuenca Barinas-Apure en las que se depositaron sedimentos continentales, calizas marinas, rocas volcánicas y sedimentos clásticos durante el Jurásico, y que son evidencia de la apertura del Protocaribe, por la extensión asociada a la separación de las Américas. Los grábenes que se encuentran localizados dentro de la cuenca, son los que se conocen como Apure y Mantecal. Según Medina (2009), la variación estimada del “espesor elástico efectivo” a lo largo de la cuenca Barinas-Apure (15 - 30 km), es menor en los flancos andinos y mayor en las zonas cercanas al escudo de Guayana.

## 2.2 Cuenca de Maracaibo

La cuenca de Maracaibo está ubicada al NO de Venezuela, abarcando un área total de 50.000 km<sup>2</sup>, correspondiente en su mayor parte al estado Zulia y extensiones menores de los estados Táchira, Mérida y Trujillo. Esta limita al OSO por la frontera colombiana hasta un punto sobre el río Guarumito, 12,5 km al oeste La Fría; al SE por el piedemonte andino desde el punto mencionado hacia el río Motatán, ligeramente al este del cruce de Agua Viva; al ONO por el piedemonte de la Sierra de Perijá; al ENE por la zona de piedemonte occidental de la Serranía de Trujillo y una línea imaginaria dirigida al norte hasta encontrar la frontera de los estados Zulia y Falcón, donde puede observarse un pequeño saliente hacia el este en la región de Quirós y en su parte norte por la línea geológica de la falla de Oca. La cuenca de Maracaibo está enmarcada por tres alineamientos orogénicos mayores, calificados como “cinturones móviles”, los cuales son: Los Andes de Mérida al SE, la Sierra de Perijá al Oeste, y la Serranía de Trujillo al Este, completando con el sistema de la falla de Oca al norte que separa la cuenca de Maracaibo del Golfo de Venezuela. Dentro de estos “cinturones móviles” se desarrollan sinclinales que integran estructuralmente a la cuenca de Maracaibo, donde los ejes de los principales anticlinales y fallas tienen una tendencia hacia el norte (González de Juana, *et al.*, 1980). La profundidad que presenta esta cuenca (10 km aproximadamente), en comparación con la de la cuenca Barinas-Apure (5 km aproximadamente) podría ser un indicativo de la posible distribución asimétrica de la carga que representan los Andes de Mérida y las diferentes edades que presentan ambas cortezas (Arnaiz-Rodríguez, *et al.*, 2011).

El basamento está constituido por rocas ígneas de composición granítica o granodiorítica y por rocas metamórficas gnéissicas. Este se encuentra conformado principalmente por cuarzo cristalino o lechoso, feldespatos rosados o anaranjados, biotita y minerales máficos secundarios. El basamento alcanza una profundidad máxima (depocentro de la cuenca de Maracaibo) de 9,71 km (Porrás *et al.*, 2007; Arnaiz-Rodríguez, *et al.*, 2011).

### 2.3 Evolución Geodinámica

En Venezuela se identifican cinco provincias principales: cadenas montañosas, regiones piedemontinas, planicies costeras, los llanos y Guayana. Siendo los llanos (260.000 km<sup>2</sup>) los que definen el área central del país, constituyendo el rasgo fisiográfico del final del relleno de las cuencas Barinas-Apure y Oriental, con una extensa red hidrográfica (Yoris y Ostos, 1997).

Hall y Wood en 1985 (citados por Arnaiz, 2009) indicaron que, debido a la convergencia entre las placas Caribe, Suramérica y Nazca, el norte de Suramérica es una de las regiones tectónicas más activas del continente entero. Esta convergencia produce una deformación constante en la corteza continental asociada a esta zona. De tal manera que, la placa Sudamericana se desplaza en dirección OSO a una velocidad de 31 mm/año aproximadamente; mientras que la placa de Nazca se desplaza en dirección Este a una velocidad de 38 mm/año; y la placa Caribe se desplaza en dirección SO a una velocidad aproximada de 19 mm/año.

Tomando como referencia a Audemard. (1991), Duerto (1998) y González (2009) la evolución geodinámica y estratigráfica de las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo de Venezuela está enmarcada en siete etapas principales:

- Pre – apertura continental durante el Paleozoico (etapa pre – *rift*).
- Apertura continental durante el Jurásico y el Cretácico inferior (etapa de *rift* y deriva).
- Periodo de margen pasivo durante el Cretácico – Paleógeno (etapa posterior a la apertura continental).
- Colisión de arco de islas contra el borde occidental de Colombia durante el Cretácico Superior - Paleoceno.
- Emplazamiento de las napas del Caribe entre el Paleoceno y el Eoceno Medio.
- Producción de un régimen de transpresión entre el Eoceno Superior y el Mioceno Medio.

- Levantamiento de los Andes de Mérida y Sierra de Perijá desde el Oligoceno al Plioceno. En el Plioceno – Pleistoceno una compresión este-oeste refuerza el depocentro norandino con más de 30,000 pies de sedimentos.

Antes de desarrollar la fase de pre-apertura continental, es necesario describir los terrenos Precámbricos que, en su mayoría forman parte de las cuencas sedimentarias al sur de la falla de Apure, ocasionados por los procesos tectónicos sufridos al norte de la placa Sudamericana a lo largo de su historia (Feo-Codecio, *et al.*, 1984; Yoris y Ostos, 1997).

Todos los terrenos Precámbricos de Venezuela se encuentran aflorando en todos los cinturones montañosos venezolanos y en el Escudo de Guayana. Estos pueden clasificarse como autóctonos y alóctonos. Los autóctonos forman parte del Escudo de Guayana y el basamento de las cuencas que se encuentran al sur de la falla de Apure. Los terrenos alóctonos iniciaron su adosamiento a Suramérica durante el Paleozoico inferior, incluyendo rocas que afloran en los alrededores de ciudades como Mérida y San Cristóbal; posteriormente, ocurrió la sutura del alóctono al Paleozoico superior durante la Orogénesis Herciniana; luego se produjo la última colisión a finales del Mesozoico, y en este alóctono se han reconocido rocas Precámbricas en los alrededores de ciudades como Caracas y el sur de Valencia (Yoris y Ostos, 1997). En la figura (Figura 11) se puede apreciar la ubicación de los distintos terrenos alóctonos y autóctonos antes mencionados.

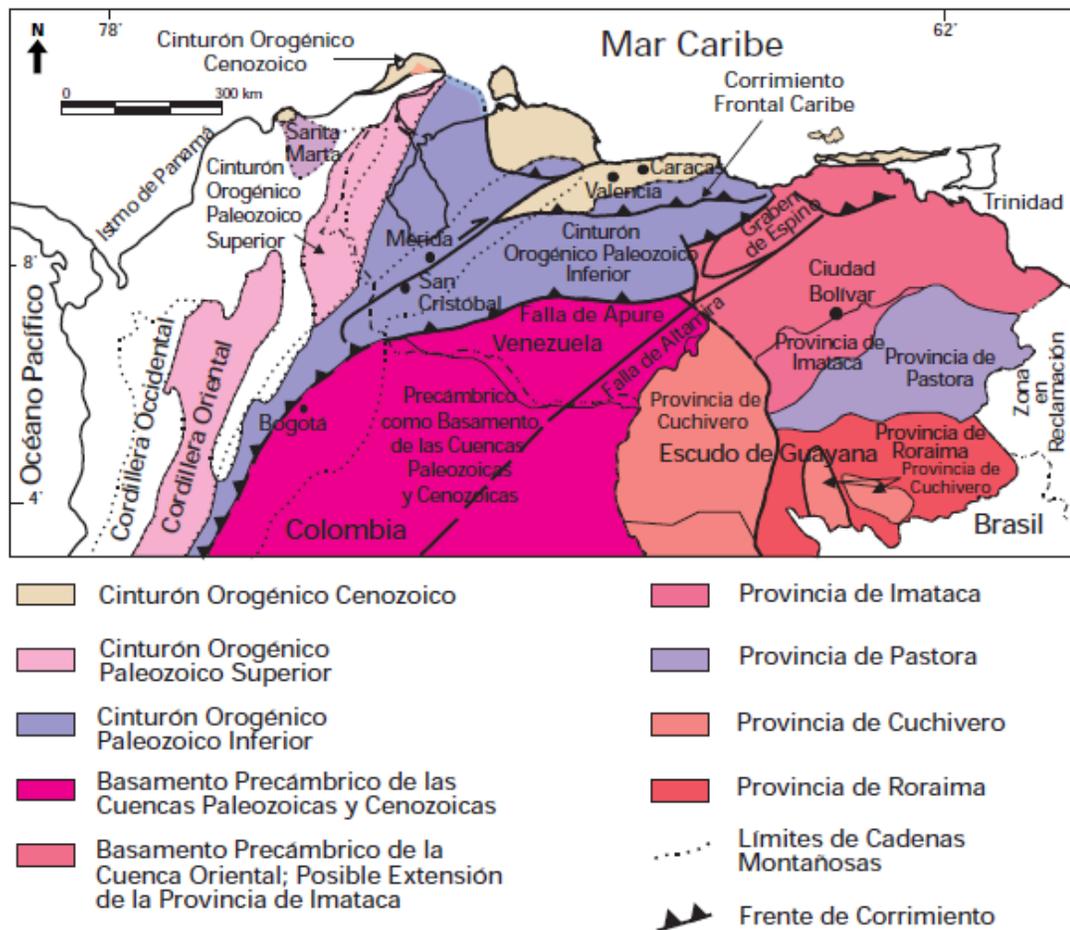


Figura 11. Ubicación de los distintos terrenos alóctonos y autóctonos Precámbricos de Venezuela (tomado de Yoris y Ostos, 1997).

### 2.3.1 Fase pre-apertura continental durante el Paleozoico (etapa pre-rift)

Durante la sedimentación Paleozoica de Venezuela se identificaron dos periodos de orogénesis, el primero ocurrido al final del Precámbrico, y el último entre el Pérmico y el Triásico, conocida como orogénesis Herciniana. Cada uno de estos periodos orogénicos alteró el carácter y distribución de los sedimentos (González de Juana, *et al.*, 1980). Las rocas que datan de esta era se agrupan geológicamente como terrenos autóctonos o alóctonos en varias regiones principales de Venezuela. El terreno autóctono se encuentra en el subsuelo de las cuencas Barinas – Apure y Oriental al sur de la falla de Apure, cuyas rocas se les conoce como “Capas Rojas” que indican la apertura de Gondwana y Laurasia. Los terrenos alóctonos se pueden determinar según la edad en la que fueron adosados tectónicamente al norte de Suramérica. Estos, luego

de adosarse en el Paleozoico inferior, se reconocieron como parte del basamento de los Andes y de la cuenca de Maracaibo (Yoris y Ostos, 1997).

La primera transgresión marina importante que ocurrió en Venezuela fue durante el Ordovícico inferior, en forma de una cuenca pericratónica bordeada al sur por la costa Precámbrica de Guayana. La sedimentación el Paleozoico está representado por las limolitas de la formación Caparo, indicativas de ambientes no muy profundos. Entre la litología de las rocas Silúricas, se encuentran conglomerados mal estratificados de grano grueso y considerable espesor de areniscas conglomeráticas; siendo esta litología un indicativo de un ciclo de inestabilidad tectónica durante este periodo. Por lo tanto, se puede decir que la sedimentación Paleozoica se generó durante el Cambro-Ordovícico, en una cuenca pericratónica sobre el borde septentrional de Guayana. Los mares cubrieron extensas zonas continentales durante el Caradociense y el Silúrico; la sedimentación de estos periodos se encuentra marcada en la región de El Baúl, en la profundidad de la cuenca de Maracaibo, Sierra de Perijá y localidades de Colombia. En el Silúrico inferior se registró la regresión marina (González de Juana, *et al.*, 1980).

El borde meridional de la cuenca del Paleozoico superior se ubicó en el borde Sur-Andino; esto produjo que la sedimentación estuviera caracterizada por cierto número de transgresiones y regresiones marginales; el surco sedimentario se desarrolló en la región central Andina, la cuenca de Maracaibo y la plataforma del borde NE de la Sierra de Perijá (González de Juana, *et al.*, 1980).

Como parte de la acreción del alóctono del Paleozoico Superior contra el Inferior, se pudieron reconocer rocas graníticas que se originaron por la subducción por debajo del borde norte de la Placa Suramericana. Entre estas rocas es importante mencionar que, las que datan del Carbonífero se encuentran presentes en el subsuelo de las cuencas Barinas-Apure, Oriental y Maracaibo (Yoris y Ostos, 1997).

### 2.3.2 Apertura continental durante el Jurásico - Cretácico inferior (etapa de *rift* y deriva)

La apertura continental o *rifting* de Pangea ocurrió en el Jurásico Medio, y generó una serie de estructuras importantes que influyeron en la evolución de las cuencas sedimentarias venezolanas. La separación de las Américas y la apertura del Proto-Caribe ocasionaron un régimen extensional que propició el desarrollo de valles de extensión o grábenes con una tendencia NE, como los grábenes de Apure-Mantecal, Espino y los que se ubican en los Andes, Perijá y Lago de Maracaibo (Figura 12). Todos estos grábenes fueron rellenados durante el Jurásico por sedimentos continentales tipo "capas rojas", rocas volcánicas, calizas marinas y sedimentos clásticos, existiendo evidencia de ello en la Formación La Quinta de Venezuela Occidental (Yoris y Ostos, 1997; Arnaiz-Rodríguez, *et al.*, 2011).

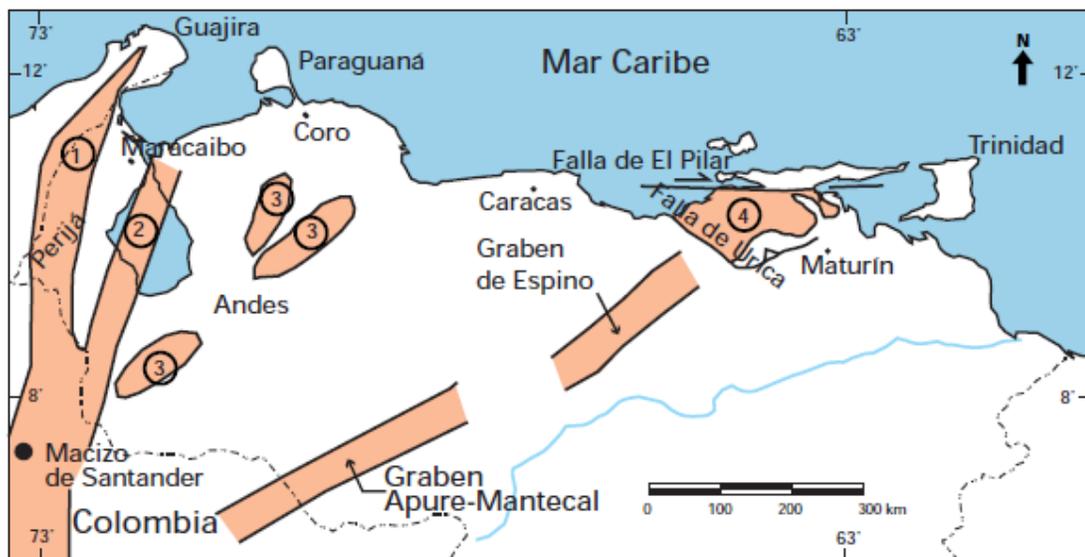


Figura 12. Distribución de las rocas jurásicas en Venezuela. (1) aflorando en la Sierra de Perijá; (2) parte del basamento de la Cuenca de Maracaibo; (3) en los Andes; (4) en el subsuelo de las cuencas de Barinas- Apure y Oriental (grábenes de Apure-Mantecal y Espino) y han sido interpretadas como involucradas en profundidad en los corrimientos de la Serranía del Interior (tomado de Yoris y Ostos, 1997).

### **2.3.3 Periodo de margen pasivo durante el Cretácico (etapa posterior a la apertura continental)**

Durante el Cretácico continua la separación de Pangea. En el Cretácico Inferior se modifica la geometría de los centros de esparcimiento oceánico y en los límites de placas cambian los estilos tectónicos, desarrollando en su totalidad el margen pasivo al norte de Suramérica. También se produjo la deposición de formaciones que desarrollaron parte de la secuencia sedimentaria en las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo (González de Juana, *et al.*, 1980; Yoris y Ostos, 1997).

La sedimentación al occidente de Venezuela estuvo controlada en su inicio por el sistema de fallas de los grábenes jurásicos, que se evidencia en los espesores clásticos arenosos de la Formación Río Negro. Posteriormente se depositó el Grupo Cogollo (carbonático) en un extenso mar epicontinental transgresivo sobre la región de Venezuela Occidental; siendo la Formación Aguardiente su equivalente clástico lateral hacia el Cratón o Escudo de Guayana. En el frente de corrimientos del norte del estado Guárico (Venezuela Central) hay evidencias del desarrollo de una plataforma carbonática. (Audemard, 1991; Yoris y Ostos, 1997).

### **2.3.4 Colisión de arco de islas contra el borde occidental de Colombia durante el Cretácico Superior - Paleoceno.**

Entre el Cretácico Superior y el Paleoceno Inferior, Venezuela Occidental sufrió el efecto de la colisión entre la Placa de Nazca y el Occidente Colombiano; controlando la sedimentación de las formaciones Catatumbo, Barco y Los Cuervos (grupo Orocué) y posiblemente las formaciones Guasare y Marcelina. Según Yoris y Ostos (1997) la colisión oblicua del arco de las Antillas Menores hacia el NO de la Placa Suramericana generó una sucesiva generación napas con vergencia hacia el sur y SE. En el Cretácico Superior inicia una transgresión marina de este a oeste de manera diacrónica. Esta invasión marina fue responsable de la sedimentación de calizas, lutitas y ftanitas ricas en materia orgánica que se asocian a las Formaciones Querecual-San Antonio (Grupo Guayuta), Mucaria, Navay y La Luna. En la cuenca de Maracaibo, la Formación La Luna pasa verticalmente a calizas glauconíticas

(Miembro Socuy) y lutitas oscuras y areniscas delgadas de las Formaciones Colón y Mito Juan (Yoris y Ostos, 1997).

El pico de deformación ocurrió en el Eoceno Medio, en el que se evidencian los primeros efectos de una deformación compresiva en la extensión SO de la Sierra de Perijá y el arco de Mérida, emergidas como zonas positivas (Audemard, 1991; PDVSA/EFAI, 2006).

### **2.3.5 Emplazamiento de las napas del Caribe entre el Paleoceno y el Eoceno Medio**

Durante este periodo continua la colisión en el occidente de Colombia (Paleoceno Medio-Tardío), pasando por el norte de la zona de Maracaibo-Santa Marta, que produce una acreción progresiva más el emplazamiento de las napas de Lara (PDVSA/EFAI, 2006). Al irse adentrando hacia el este la Placa Caribe, la influencia de los frentes de corrimiento se alejaba, produciendo cambios de la sedimentación en la región central norte de Venezuela. Más al sur, el peso de las napas produjo la consecuente flexión de la litósfera dando como resultado un pulso de avance de clásticos arenosos (Yoris y Ostos, 1997).

### **2.3.6 Producción de un régimen de transpresión entre el Eoceno Superior - Mioceno Medio.**

Durante el Eoceno Superior y el Oligoceno, ocurre la producción de un régimen transpresivo e inició el levantamiento andino y proto-Perijá con la generación de estructuras asociadas al movimiento relativo de la Placa Caribe hacia el este, simultáneamente con la redistribución de los depocentros de la cuenca de Maracaibo, en la que la acumulación de sus sedimentos fue preservada mayormente hacia sus flancos (Figura 13). Además de esto, la cuenca Barinas-Apure y el oriente de la cuenca de Maracaibo sufrieron una erosión importante (Yoris y Ostos, 1997; Duerto, 1998; PDVSA/EFAI, 2006).

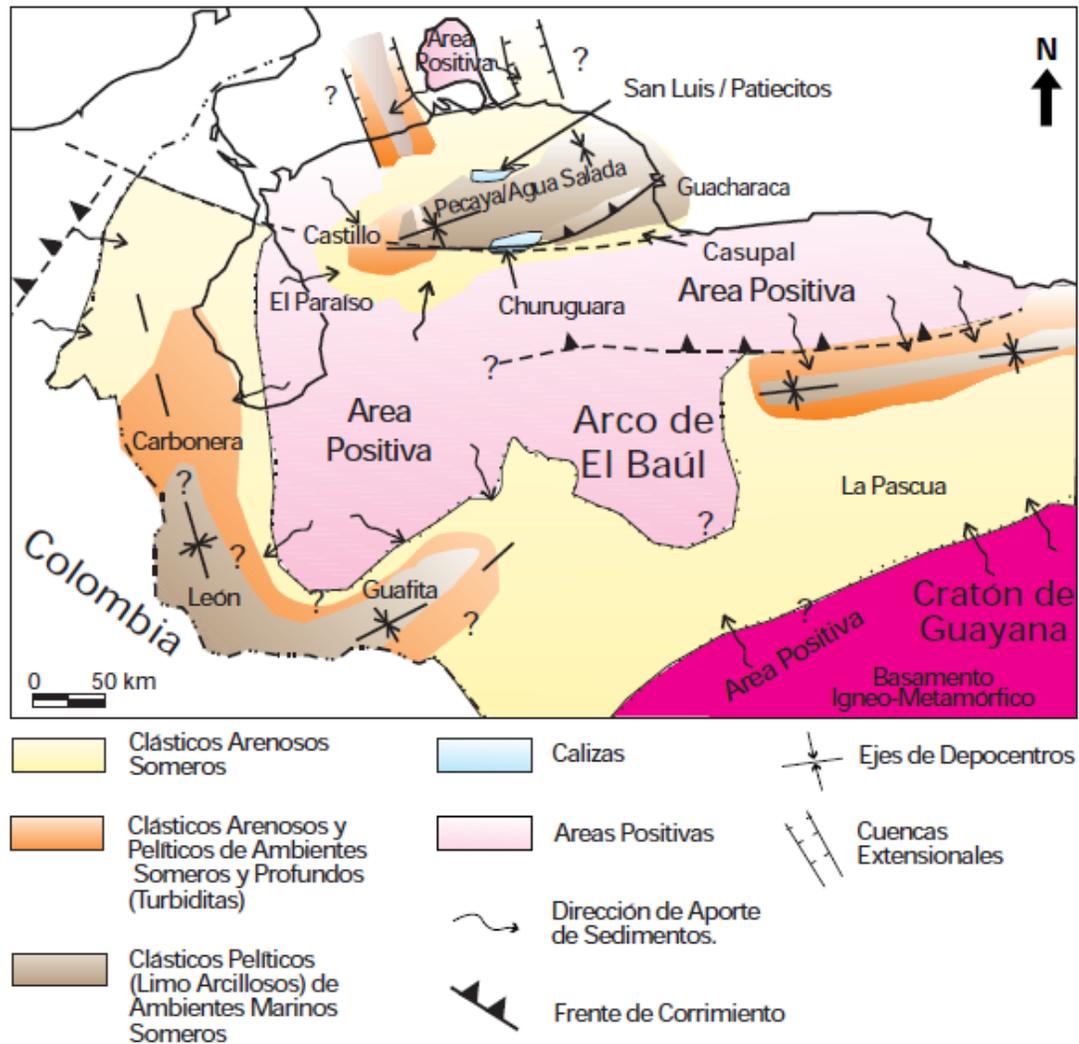


Figura 13. Marco geológico regional para la sedimentación en Venezuela Occidental (Cuencas de Maracaibo, Falcón, Barinas-Apure y Oriental-Subcuenca de Guárico) durante el Oligoceno (tomado de Yoris y Ostos, 1997).

**2.3.7 Levantamiento de los Andes de Mérida y Sierra de Perijá desde el Oligoceno al Plioceno. En el Plioceno – Pleistoceno una compresión EO refuerza el depocentro norandino con más de 30,000 pies de sedimentos**

Continúa el levantamiento de la Sierra de Perijá y los Andes de Mérida desde el Oligoceno, como se mencionó anteriormente, hasta el Plioceno; provocado por la colisión de los terrenos Baudo-Chocó contra Colombia. Los Andes venezolanos fueron considerados como la estructura emergida principal durante el Mioceno-Plioceno.

Se produjo la generación de cuencas tipo antepaís (Barinas – Apure y Maracaibo), influenciada por la orogénesis andina. Los Andes superaron la Sierra de Perijá como fuente de sedimentos principal y separó las cuencas antepaís asociadas. La cuenca de Maracaibo al norte y la cuenca Barinas-Apure al sur (Audemard, 1991).

En el Plioceno, la orogénesis que ocurrió en el norte de Venezuela terminó de definir las cuencas petrolíferas actuales (Figura 9) y levantó extensas zonas constituyendo el Sistema de Montañas del Caribe y el ramal de los Andes Venezolanos, el cual separa a las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure (Yoris y Ostos, 1997). En el Plioceno – Pleistoceno una compresión EO refuerza el depocentro norandino con más de 30,000 pies de sedimentos (Audemard, 1991). La convergencia oblicua relativa entre el Bloque triangular de Maracaibo y la Placa Suramericana durante el Plioceno, aceleró el levantamiento de las cadenas montañosas antes mencionadas (Arnaiz *et al.*, 2011)

#### **2.4 Estratigrafía de las cuencas Barinas – Apure y Maracaibo**

A continuación, se muestra una serie de tablas que describen la estratigrafía generalizada correspondiente a las unidades litológicas presentes en las cuencas Barinas – Apure y Maracaibo según su tiempo geológico. Toda la información utilizada para elaborar estas tablas (Tabla 1, Tabla 2), provienen del Léxico Estratigráfico de Venezuela.

Tabla 1. Columna estratigráfica de la cuenca Barinas – Apure.

Cuenca Barinas-Apure						
Columna geológica			Formación	Litología tipo		
MESOZOICO	Neógeno	Plioceno		Rio Yuca	Estratos macizos de conglomerados, areniscas, limolitas y arcillitas	
		Mioceno	Superior			
			Medio	Parángula	Conglomerados (solo en el tope), areniscas glauconíticas, limonitas y lodolitas.	
			Inferior			
		Paleógeno	Oligoceno		Guafita	alternancia de areniscas, arenas, wacas cuarzosas y arcósicas, lutitas, arcillitas, limolitas y capas delgadas de lignito
			Eoceno	Medio	Paguey	Lutitas marinas (tope). Lutitas que gradan hacia arriba a limolitas y areniscas de grano fino (base)
	Gobernador				Areniscas cuarzosas, a veces cuarcíticas. Intercalaciones de limolitas.	
	Cretácico		Superior	Maastrichtiense	Navay	Burguita
		Campaniense				
		Santoniense				
Coniaciense						
Turnoniense	Escandalosa	Areniscas macizas, cuarzosas y muy glauconíticas, con cantidades menores de lutitas negras calcáreas.				
Cenomaniense						
Inferior	Albiense	Aguardiente	Areniscas calcáreas glauconíticas, con intercalaciones de lutitas micáceas y carbonáceas y algunos lechos de caliza en la parte inferior. Areniscas cuarzosas			

Tabla 2. Columna estratigráfica de la cuenca de Maracaibo (modificado de Rivero, 2016).

Cuenca de Maracaibo					
Columna geológica			Formación	Litología tipo	
CENOZOICO	Qr.	Holoceno		La Puerta	Arcillitas, limolitas y areniscas.
		Pleistoceno		Isnotú	Arcillas y areniscas. Carbón
	Neógeno	Plioceno		Lagunillas	Areniscas poco consolidadas, arcillas, lutitas y lignitos.
		Mioceno		La Rosa	Areniscas arcillosas poco consolidadas. Areniscas.
	Paleógeno	Oligoceno		Icotea	Lutitas y areniscas.
		Eoceno	Superior	Paují	Lutitas.
			Medio	Misoa	Lutitas, areniscas, limolitas y calizas.
			Inferior		
Paleoceno		Guasare	Calizas glauconíticas, lutitas, limolitas y areniscas calcáreas y glauconíticas.		
MESOZOICO	Cretácico	Superior	Maastrichtiense	Mito Juan	Arcillas arenosas y limosas. Calizas y areniscas.
			Campaniense	Colon	Lutitas piríticas, micáceas y glauconíticas. Margas.
			Santoniense	La Luna	Calizas y lutitas

Cuenca de Maracaibo						
Columna geológica				Formación	Litología tipo	
			Coniaciense		calcáreas.	
			Turnoniense			
			Cenomaniense			
	Inferior			Albiense	Maraca	Areniscas glauconíticas y calcáreas. Calizas bioclásticas, margas y lutitas
					Lisure	Areniscas y calizas glauconíticas. Lutitas arenociliosas y calizas lutíticas.
				Aptiense	Apón	Calizas, lutitas, margas, dolomitas y calcarenitas.
				Barremiense	Rio Negro	Areniscas conglomeráticas cuarzosas y feldespáticas, arcillas y lutitas.
				Neocomiense		
				Jurásico		
	Triásico	Superior	Raetiense			
PALEOZOICO	Carbonífero		Pensilvaniense	Mucuchachí	Pizarras limosas, carbonosas y filíticas. Areniscas. Pirita.	

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 Estructura de la Tierra**

El interior de la Tierra se caracteriza por un aumento gradual de la temperatura, la presión y la densidad a medida que aumenta la profundidad, donde la temperatura alcanza valores entre 1.200 °C y 1.400 °C a una profundidad de 100 kilómetros, mientras que, en el centro de la Tierra, a 6300 kilómetros de profundidad, puede alcanzar una temperatura de 6.700 °C. El aumento gradual de la temperatura y la presión con la profundidad afecta a las propiedades físicas y químicas de los materiales terrestres. Cuando una sustancia se calienta, sus enlaces químicos se debilitan y su resistencia mecánica se reduce (Tarbuck y Lutgens, 2005). La estructura de la Tierra es conocida principalmente por el estudio del comportamiento de las ondas sísmicas al viajar a través del interior de la Tierra. De acuerdo a los cambios de velocidad, refracción y reflexión de las mismas, se ha podido caracterizar el interior de la tierra en capas concéntricas conocidas como corteza, manto y núcleo. (Figura 14)

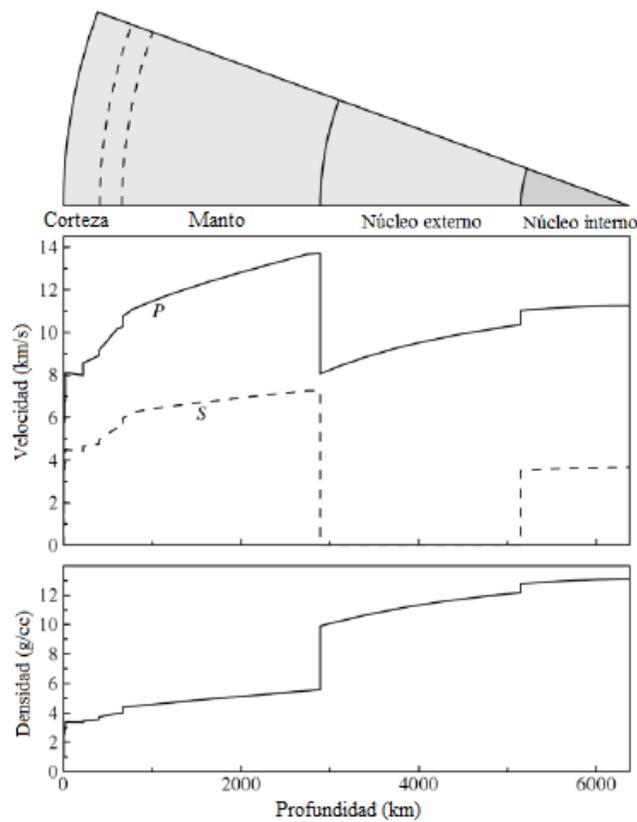


Figura 14. Variación de la velocidad de las ondas P y ondas S y densidad con la profundidad (Modificado de Shearer, 2009).

(a) Corteza

Es la envoltura más externa de la Tierra, la cual posee un espesor que oscila entre 5 km y 75 km. Esta se subdivide en continental y oceánica. La discontinuidad de Mohorovicic separa abruptamente la corteza del manto, donde la velocidad de las ondas compresionales u ondas P es significativamente más alta por debajo de esta discontinuidad. (Schlumberger Oilfield Glossary). La corteza continental se divide en tres capas: corteza superior con velocidades de onda P entre 5,7 km/s y 6,3 km/s; corteza media con una velocidad de onda P entre 6,4 km/s 6,7 km/s; y la corteza inferior con velocidades de onda P entre 6,8 km/s y 7,4 km/s. Esta variación de velocidad da origen a la discontinuidad de Conrad, la cual no se encuentra desarrollada en todas las partes de la corteza terrestre, pero cuando está presente se

encuentra normalmente a una profundidad entre 15 km y 25km (Tarbuck y Lutgens, 2005).

(b) Manto

Es una capa gruesa de casi 2.900 km de espesor, que se extiende desde la base de la corteza hasta el núcleo externo líquido. El manto se divide en mesosfera o manto inferior, que se extiende desde el límite núcleo-manto (discontinuidad de Wiechert-Gutenberg) hasta una profundidad de 660 kilómetros (discontinuidad de Repetti); y astenosfera o manto superior, que continúa hasta la base de la corteza (discontinuidad de Mohorovicic). A una profundidad de unos 410 kilómetros se produce un aumento relativamente abrupto de la velocidad sísmica, que representa el inicio de la zona de transición entre el manto superior y manto inferior. Mientras el límite corteza-manto representa un cambio de composición, la zona de aumento de velocidad sísmica al nivel de los 410 kilómetros se debe a un cambio de fase. (Schlumberger Oilfield Glossary) (Tarbuck y Lutgens, 2005).

(c) Núcleo

La capa más interna de la Tierra, que se extiende desde el borde inferior del manto hasta el centro de la Tierra. Los estudios sísmicos de las ondas compresionales y de corte indican que el núcleo se subdivide en núcleo externo y núcleo interno, donde el límite entre estos es conocido como la discontinuidad de Lehman. Dichos estudios demuestran que, el núcleo externo está compuesto de líquido debido a que las ondas de corte no viajan a través del mismo. En cambio, el núcleo interno es sólido y posee un espesor de 1.220 km. (Schlumberger Oilfield Glossary) (Tarbuck y Lutgens, 2005).

### **3.2 Ondas sísmicas**

Las ondas sísmicas son un grupo de energía de deformación elástica que se propagan a través del medio desde una fuente sísmica como un terremoto o una explosión. Fuentes adecuadas para prospecciones sísmicas generalmente generan frentes de onda de corta duración, conocidos como pulsos, que usualmente contienen una amplia gama de frecuencias, a excepción de los que se producen de manera inmediata a la fuente, donde los esfuerzos asociados con el grupo de pulsos sísmicos son mínimos y

pueden ser asumidos como elásticos. En este supuesto, la propagación las velocidades de los pulsos sísmicos están determinadas por módulos elásticos y densidades de los materiales por los que pasan (Kearey, *et al.*, 2002).

Para la relación entre los principales reflectores-refractores y los tiempos recorridos, se aplica el método de los frentes de ondas con el principio de Huygens (Figura 15), el cual indica que cada punto en un frente de ondas podrá ser visto como un nuevo fuente de ondas; propagación mediante interferencia constructiva. Los rayos son definidos como los normales a los frentes de ondas. La geometría de los rayos es basada en el principio de Fermat, que indica que el rayo recorre entre dos puntos el camino de mínimo tiempo (Schmitz, 2016). Entre los tipos ondas sísmicas que existen, se encuentran las ondas corpóreas y ondas superficiales

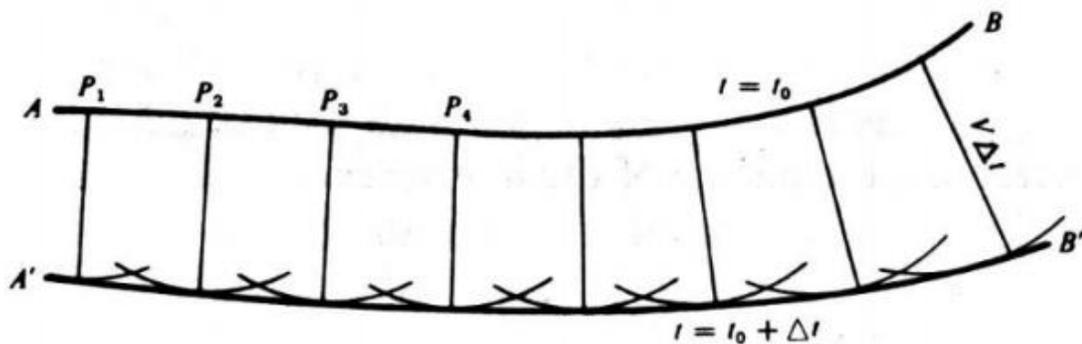


Figura 15. Principio de Huygens (tomado de Telford, *et al.*, 1990)

### 3.2.1 Ondas corpóreas

Las ondas corpóreas se propagan a través del volumen interno de un sólido elástico de forma esférica. Existen dos tipos de ondas corpóreas: compresionales y de corte. Las ondas compresionales (longitudinales, primarias u ondas P en un terremoto) se propaga por compresión y dilatación uniaxial de esfuerzos en la dirección del viaje de la onda. El movimiento de partículas asociado con el paso de una onda compresional, implica oscilación alrededor de un punto fijo, en la dirección de propagación de onda. Las ondas de corte (transversales, secundarias u ondas S en un terremoto) se propagan por un esfuerzo cortante en dirección perpendicular a la dirección de viaje de la onda. Los movimientos de partículas individuales involucran oscilación alrededor de un punto fijo, en un plano con ángulo recto a la dirección de

propagación de la onda (Kearey, *et al.*, 2002). Debido a que las ondas P y S deforman la roca de diferentes maneras, entonces las fuerzas de restauración son diferentes, dando como resultado que estas viajen a diferentes velocidades. Las ondas P son siempre más rápido, por lo que las ondas P llegan antes que las ondas S. Vale mencionar que, debido a que los líquidos pueden tomar cualquier forma y no tienen tendencia a enderezarse si son deformados, esto genera que las ondas S no puedan viajar a través de un líquido; sin embargo, las ondas P pueden porque un líquido resiste la compresión (Mussett y Khan, 2000).

Si un frente de onda (representado análogamente como un rayo sísmico) encuentra un cambio abrupto en las propiedades elásticas de un material, puede generar que una parte de la energía sea reflejada y otra parte sea refractada con un cambio brusco en su dirección (Figura 16).

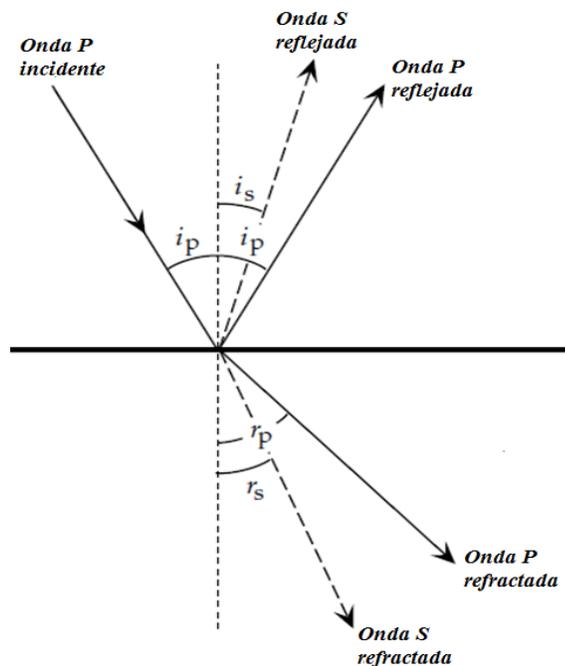


Figura 16. Refracción y reflexión de ondas corpóreas a partir de la incidencia de una onda P sobre una interfase (modificado del Lowrie, 2007)

El principio afirma de Fermat indica que la trayectoria que sigue un rayo sísmico entre dos puntos es aquella en la que emplea un tiempo mínimo en recorrerla, sin

embargo, al pasar a través de un medio con múltiples capas, la dirección del rayo se desvía cuando pasa de una capa a otra (Figura 17).

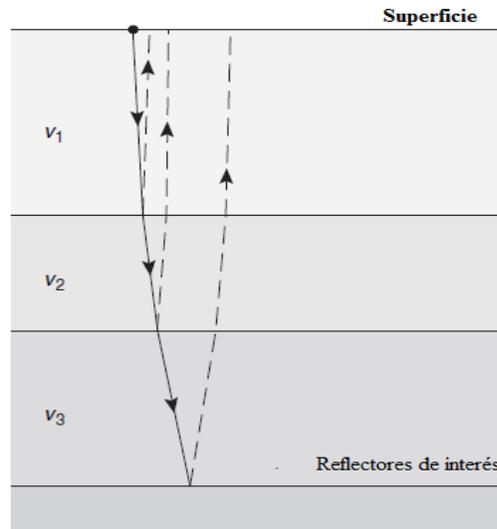


Figura 17. Recorrido del rayo sísmico en múltiples capas (modificado de Mussett y Khan, 2000)

Además, las propiedades elásticas de una capa son usualmente no homogéneas, generando una velocidad sísmica variable y por consiguiente que la trayectoria del rayo sísmico en la capa sea de forma curva.

### 3.3 Sísmica de gran ángulo

El método sísmico consiste en utilizar la propagación de ondas a través del subsuelo, debido a que esta propagación depende de las propiedades elásticas de las rocas. La técnica básica de exploración sísmica consiste en la generación de ondas sísmicas y en la medición del tiempo que requieren las ondas para que viajen desde la fuente hasta una serie de geófonos, los cuales están usualmente distribuidos a lo largo de una línea recta hacia la fuente. A partir del conocimiento de los tiempos de viaje y la velocidad de las ondas, se puede reconstruir el camino de la onda sísmica y determinar si estas se refractan o se reflejan. Y tomando en cuenta las variaciones de amplitud, frecuencia, fase y forma de las ondas, se podrán determinar las posiciones de las distintas interfases y las velocidades de las ondas al viajar por las mismas (Telford, et al., 1990). Para la adquisición de datos sísmicos de gran ángulo (sísmica

profunda) se utilizan perfiles que pueden llegar a medir miles de kilómetros y fuentes explosivas, a diferencia de los estudios de sismica somera donde se utilizan perfiles de decenas de metros y fuentes impulsivas generalmente.

Los sismogramas de refracción también pueden contener reflexiones como llegadas posteriores. Sin embargo, los coeficientes de reflexión relativamente altos que están asociados con rayos incidentes en una interfaz de ángulos cercanos al ángulo crítico, a menudo conducen a fuertes reflexiones de gran ángulo que son bastante comunes en los mayores rangos de registro que se caracterizan a gran escala en sondeos de refracción (Figura 18). Estas reflexiones de gran ángulo a menudo proporcionan información valiosa sobre las estructuras presentes en el subsuelo como, por ejemplo, indicar la presencia de una capa de baja velocidad que no sería revelado solo por las llegadas refractadas (Kearey, *et al.*, 2002).

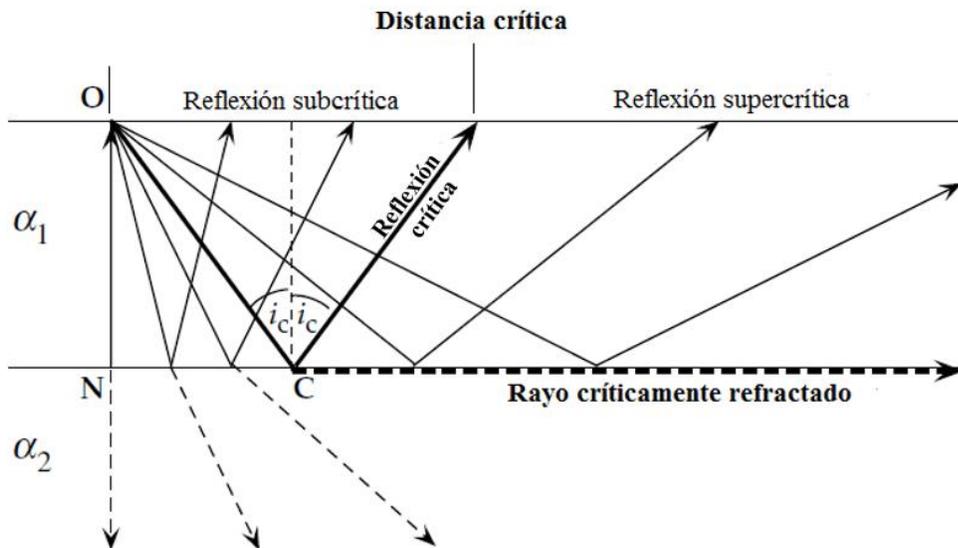


Figura 18. Reflexiones y refracciones críticas (modificado del Lowrie, 2007).

### 3.4 Fases sísmicas

La interpretación de las secciones sísmicas depende de la identificación de las distintas fases sísmicas, también conocidas como fases corticales. Estas fases ofrecen información sobre la profundidad y velocidad del basamento cristalino, el límite corteza manto y el manto litosférico (Giese, 1976a).

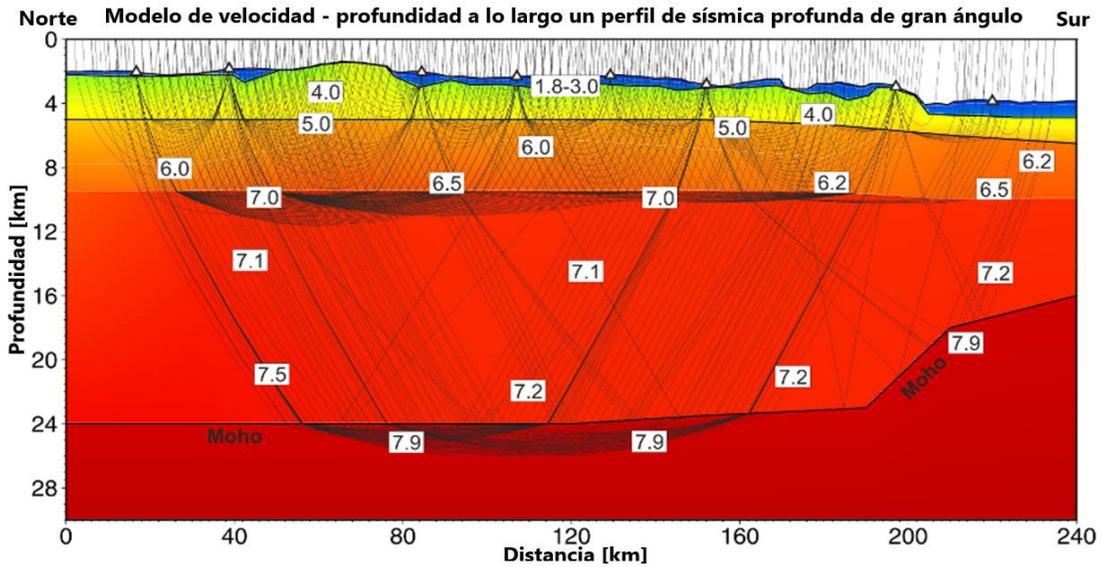


Figura 19. Modelo de velocidad-profundidad a lo largo de un perfil de sísmico en el que se indica la trayectoria y las velocidades de los rayos sísmicos través de las principales interfases (modificado de Gohl y Uenzelmann-Neben, 2012).

Entre las distintas fases sísmicas, se pueden encontrar las siguientes:

- Fase de onda Pg: Esta fase está relacionada con el basamento cristalino, incluyendo una posible cobertura sedimentaria. Es un grupo de ondas que son refractadas viajando a través de la corteza superior y los estratos sedimentarios suprayacentes. Puede llegar a velocidades de 6,4 km/s y generalmente pueden ser detectables hasta los 100 km de distancia (Giese, 1976a).
- Fase de onda PmP o Pm: Esta fase corresponde a la energía reflejada en la discontinuidad de Mohorovicic (corteza - manto). Este grupo de ondas presenta grandes amplitudes cercanas al punto crítico y pueden llegar a una velocidad promedio de 8,2 km/s (Giese, 1976a).
- Fase de onda Pn: Corresponde a la onda que se refracta en el manto superior y viaja por debajo de la discontinuidad de Mohorovicic. Generalmente son detectables a más de 130 km de distancia entre la fuente y el receptor y pueden llegar a una velocidad entre 7,7 km/s y 8,5 km/s (Giese, 1976a).

### 3.5 Múltiples reflexiones o reverberaciones

Los múltiples, también llamados reverberaciones, son eventos que han padecido más de una reflexión. Esto ocurre porque la amplitud del múltiple es proporcional al producto del coeficiente de reflexión para cada uno de los reflectores involucrados. Estos son muy pequeños para la mayoría de las interfases, solo los contrastes de impedancia más fuertes generan múltiples lo suficientemente fuertes para ser reconocidos como eventos. Se pueden distinguir dos clases de múltiples: trayectoria larga y trayectoria corta. El de trayectoria larga es el que presenta una trayectoria de viaje larga en comparación con la primera reflexión desde la misma interfaz profunda y por lo tanto los múltiples de trayectoria larga aparecen como eventos separados en un registro sísmico. En cambio, los múltiples de trayectoria corta llegan tan pronto después que la primera reflexión asociada, que interfiere con esta y se agrega a la cola de la primera reflexión, por lo tanto su efecto es que cambia la forma de la onda de tal manera que se producen eventos separados (Figura 20) (Telford, 1990).

Un múltiple de trayectoria corta que ha sido reflejado exitosamente desde el tope hasta la base de un reflector delgado, a menudo es llamado múltiple *peg-leg* (Figura 20), y estos son importantes en la alteración de la forma de la onda. Un múltiple *peg-leg* retrasa parte de la energía, debido al alargamiento de la onda. La mayoría de los múltiples *peg-leg* tienden a tener una misma polaridad como la primera (debido a que el sucesivo gran contraste de impedancia tiende a ser en dirección contraria; sin embargo, un sucesivo gran cambio en velocidad ocasionaría que la velocidad excediera su rango permitido). Esto efectivamente disminuiría la frecuencia de la señal a medida que el tiempo incrementa. En la Figura 20 también se pueden observar los múltiples *ghost*. Estos ocurren cuando el viaje de la energía hacia abajo del disparo, ha superpuesto a la energía que inicialmente viajaba hacia arriba y entonces fue reflejada hacia abajo en la base del LVL (sondeos en suelo) o en la superficie del agua (en sondeos marinos) (Telford, *et al.*, 1990).

Debido a que la velocidad de la onda generalmente aumenta con la profundidad, los múltiples usualmente exhiben un desplazamiento de salida más normal que la primera

reflexión como mismo tiempo de viaje. Esta es la base de la atenuación de múltiples en la etapa de procesamiento CMP (*common-midpoint*). (Telford, *et al.*, 1990).

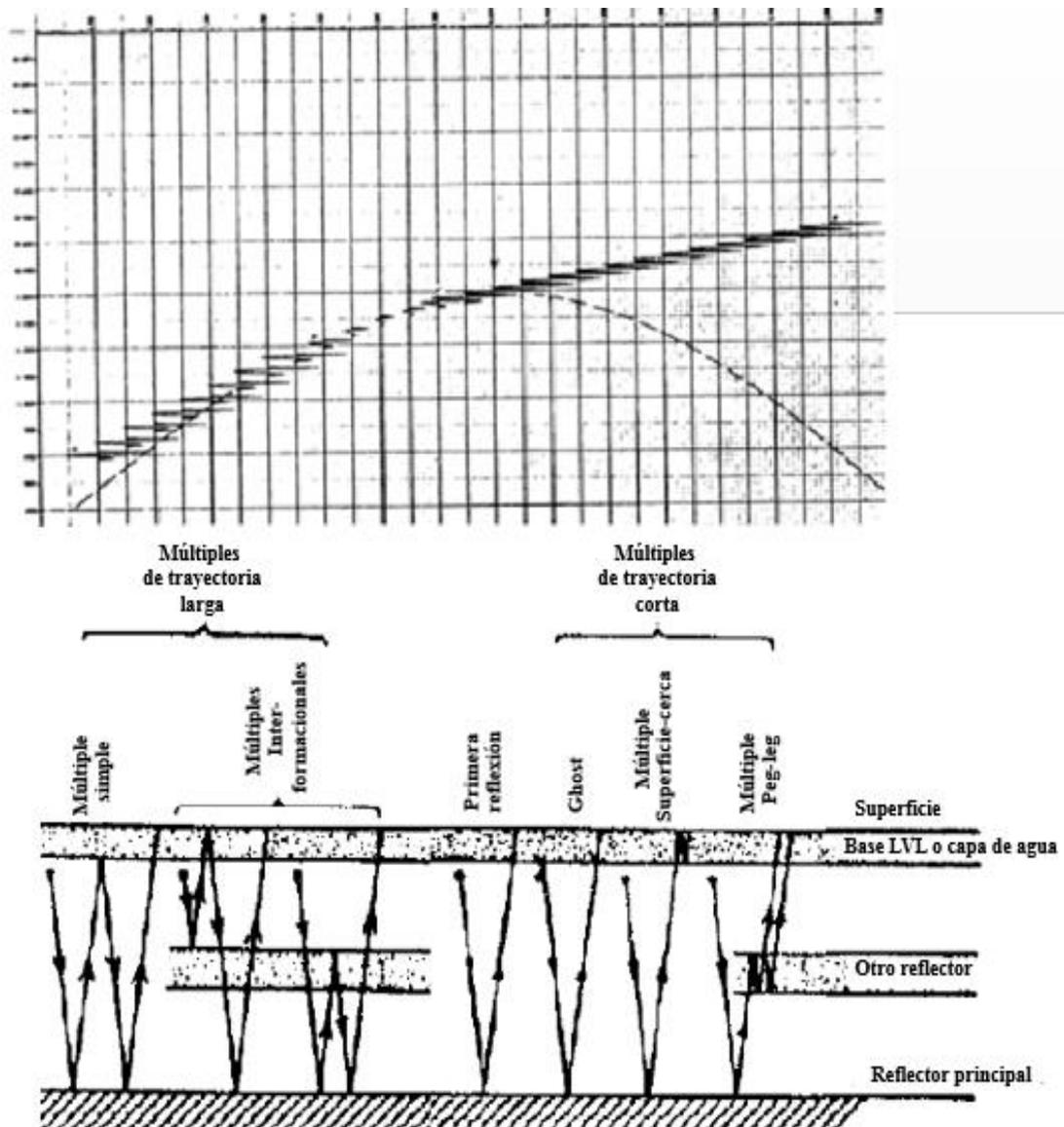


Figura 20. Sección sísmica y geometría de los tipos de múltiples (modificado del Telford, *et al.*, 1990).

### 3.6 Impedancia sísmica

También se le conoce como impedancia acústica, y es el producto de la densidad por la velocidad de ondas compresivas, la cual varía entre las diferentes capas de rocas en el subsuelo y se indica generalmente con el símbolo  $Z$ . La diferencia o contraste de impedancia acústica entre las capas de rocas afecta principalmente el coeficiente de reflexión (Schlumberger Oilfield Glossary). La impedancia sísmica depende de la mineralogía de las rocas y de su contenido de fluidos. En general se puede decir que cuanto más resistente sea una roca, mayor será su impedancia acústica y cuanto menor sea el contraste impedancia acústica a través de una interfase, mayor será la proporción de energía transmitida a través de esa interfase. Para un rayo sísmico que incide sobre una superficie, el coeficiente de reflexión  $CR$  es la razón de la amplitud del rayo reflejado  $A_1$  y la amplitud del rayo incidente  $A_0$  (ecuación 1) (Lowrie, 2007).

$$CR = \frac{A_1}{A_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 \alpha_2 - \rho_1 \alpha_1}{\rho_2 \alpha_2 + \rho_1 \alpha_1} \quad (\text{ecuación 1})$$

### 3.7 Secciones sísmicas en tiempo reducido

Una sección sísmica es la representación gráfica de un frente de onda en tiempo y distancia. Esta se puede representar de manera simple o reducida. En la sección de tiempo simple, el tiempo de disparo es el tiempo inicial en cada distancia, por lo tanto, representa el tiempo total de la distancia recorrida por la onda que se genera. Mientras que la sección de tiempo reducido (usualmente utilizada en la sísmica de gran ángulo), consiste en realizar la diferencia entre el tiempo total de viaje y la distancia dividida por una velocidad de reducción definida (ecuación 2) (Giese 1976b).

$$t_{red} = t - \frac{x}{v_{red}} \quad (\text{ecuación 2})$$

Este método de representación tiene la ventaja de que se puede graficar una mayor cantidad de tiempo de grabación en menos espacio, facilitando la interpretación de las fases.

### 3.8 Principio del método del trazado de rayo

Se basa en representar la trayectoria de un frente de ondas desde una fuente, con un determinado ángulo de incidencia, hasta un determinado número de receptores. Aplicando la ley de Snell (ecuación 3), la cual explica la relación entre los ángulos de incidencia y los ángulos de reflexión y de refracción, se calcula la trayectoria descrita por el rayo hasta que llegue a la superficie o a cualquier otro límite del modelo. La trayectoria dependerá de las velocidades y espesores de las capas presentes en el modelo de velocidades del subsuelo (Gebrande, 1976). En la sismica usualmente sucede que la velocidad de la capa inferior sea mayor que la de la capa superior; y cuando esto sucede existe un ángulo particular de incidencia, conocido como ángulo crítico, en el cual el ángulo de refracción es de 90°.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (\text{ecuación 3})$$

### 3.9 Modelado directo

Esta técnica se implementa utilizando como base el principio del método de trazado de rayos, en que se calculan los tiempos de viaje de las ondas a través de un modelo definido por el usuario. Esta técnica es utilizada principalmente en la interpretación de datos sísmicos de refracción, donde los tiempos de viaje de la onda son calculados, se contrastan con los observados y se van realizando ajustes para generar un modelo coherente (Zelt *et al.*, 1988). El intérprete define los límites de las capas mediante una determinada cantidad de nodos que se interpolan linealmente entre sí. Del mismo modo es definida la velocidad de la onda P en la base y en el tope de la capa. Por lo tanto, se pueden calcular linealmente las velocidades de base a tope y de nodo a nodo, a través de una interfase (Zelt y Smith, 1992).

Entre los principales grupos de rayos que son considerados para modelar los tiempos de llegadas de datos de gran ángulo están: refracción, reflexión, reflexión flotante, múltiples y conversión, ondas de cabeza y reflexión cero-offset (Figura 21). Los principales pasos a seguir al modelar datos de tiempo de viaje de sismica de gran

ángulo son los siguientes: (1) selección de las llegadas; (2) verificación de reciprocidad; (3) proyección en línea recta; (4) desarrollo de un modelo inicial; (5) inversión de datos; (6) usar los tiempos de viaje predichos para identificar selecciones adicionales; (7) más inversiones si es necesario; y (8) evaluación indirecta y directa del modelo. En algunos casos, el modelado de amplitud 1-D o 2-D en algún punto entre los pasos (4) y (8) puede ser apropiado para proporcionar una restricción adicional en características particulares del modelo, tales como gradientes de velocidad y discontinuidades (Zelt, 1999).

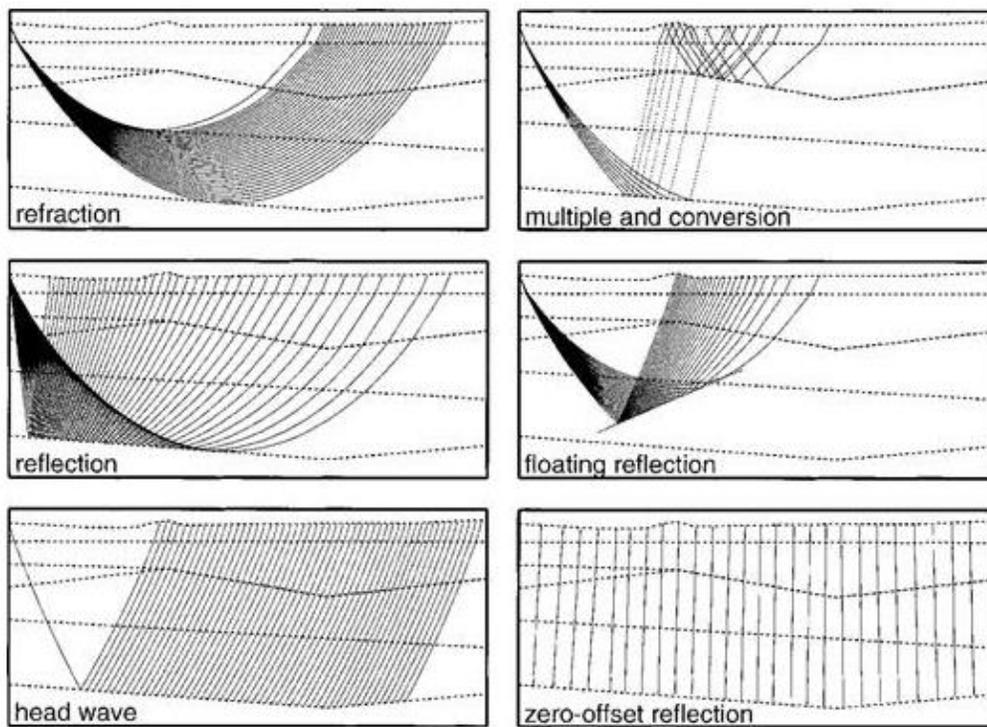


Figura 21. Principales grupos de rayos que son considerados para modelar los tiempos de llegadas de datos de gran ángulo (tomado de Zelt, 1999).

### 3.10 Método de modelado de reflectividades

Este método de modelado representa la propagación de ondas en el dominio de frecuencia-número de onda, y se ocupa principalmente del cálculo de la matriz del coeficiente (o propagador) en el dominio de la frecuencia-número de onda. Mediante el uso de las transformadas de Fourier, los resultados del modelado sísmico se pueden transformar de nuevo en el dominio del espacio-tiempo. El modelado de reflectividad

es generado en un sistema de coordenadas cilíndricas, a través del cual se pueden reducir las ecuaciones de onda en 1D (Ma, *et al.*, 2004).

La teoría del modelado describe el comportamiento de las ondas a través de modelos del subsuelo convenientemente estratificados. Donde todos los tipos de onda se pueden descomponer en ondas ascendentes y descendentes; y las ondas se pueden desacoplar en los tipos de ondas P-SV (polarizadas en el plano vertical) y SH (polarizadas en el plano horizontal) (Kennett, 2009). Donde las reflexiones, transmisiones, conversiones de todos los modos de onda, y los correspondientes múltiples (o reverberaciones) dentro de capas delgadas intercaladas insertadas entre dos medios espacios o una superficie libre y un medio espacio, pueden ser totalmente modelados. A continuación, se muestra la ecuación de onda que es utilizada en el modelado de reflectividad (ecuación 4)

$$\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial z} = \omega \mathbf{A} \mathbf{b} + \mathbf{F} \quad (\text{ecuación 4})$$

Donde  $\mathbf{b}$  es un vector compuesto de desplazamiento y tracción.  $\mathbf{A}$  es una matriz que refleja las propiedades de un medio por el que las ondas se propagan, y  $\mathbf{F}$  es la fuerza motriz.

Müller (1985) determinó la siguiente fórmula para el cálculo de las ondas P-SV de campo lejano en la superficie ( $z = 0$ )(ecuación 5).

$$\begin{pmatrix} u_r \\ u_z \end{pmatrix} = \frac{\omega}{4\pi\rho_m} \sum_{i=1}^2 \epsilon_i \int_0^\infty J_i UT^+ [I - R^- R^+]^{-1} (S_i^u + R^- S_i^d) du \quad (\text{ecuación 5})$$

Donde  $u_r$  y  $u_z$  son los componentes radial y vertical del desplazamiento, respectivamente;  $\rho_m$  es la densidad a nivel  $z_m$ ;  $J_i$  denota matrices relacionadas con las funciones de Bessel de primer tipo, es decir,  $J_0$  y  $J_1$ ;  $R^+$  es la matriz del coeficiente de reflexión total entre  $z_m$  y  $z_1 (= 0)$ ;  $R^-$  es la matriz de reflexión total entre la mitad inferior del espacio y  $z_m$ ;  $T^+$  es la matriz de transmisión total entre  $z_m$  y  $z_1$ ;  $S_i^u$  y  $S_i^d$  son términos de radiación de fuente en las direcciones ascendentes y descendentes, respectivamente; y  $\epsilon_i$  está relacionado con las magnitudes de una fuente puntual enterrada a una profundidad  $z$  (Ma, *et al.*, 2004).

El cálculo de los coeficientes (o propagador) de la matriz en el dominio F-K (frecuencia-número de onda) se obtiene utilizando un algoritmo recursivo, expresado por Müller (1985) en las siguientes ecuaciones:

$$MT_i = E_i MB_i E_i \quad (\text{ecuación 6})$$

$$MB_i = R_{i+1}^d + T_{i+1}^u + [I - MT_{i+1} R_{i+1}^u]^{-1} MT_{i+1} T_{i+1}^d \quad (\text{ecuación 7})$$

En las ecuaciones anteriores (ecuación 6) (ecuación 7), se pueden observar exponentes u y d, que representan las direcciones hacia arriba y hacia abajo, respectivamente. Las matrices  $MT_{i+1}$  y  $MB_i$  están relacionadas con el tope y la base de la capa i, respectivamente. Mientras que  $T_{i+1}$  se refiere a la matriz de transmisión en la capa i + 1. Finalmente,  $E_i$  se refiere al término de cambio de fase en la capa i.

### 3.11 Normalización de las trazas

La normalización de las trazas permite la recuperación de amplitudes, tanto positivas como negativas reales de las trazas. Según Barragán *et al.*, en 1991 (citados por Medina, 2017), esta pérdida de energía puede ser producida por efectos de atenuación como la divergencia esférica, que se trata de la energía que pierde la onda a medida que se propaga por el medio, perdida por absorción o fricción y la partición de la energía que ocurre cuando la onda alcanza un contraste de impedancia producido por la interfaz entre dos capas. Además de recuperar amplitudes perdidas, la normalización de las trazas evita el solapamiento de las mismas.

### 3.12 Filtro

Puede definirse un filtro como cualquier dispositivo que modifica de un modo determinado una señal que pasa a través de él, seleccionando un rango de frecuencias usualmente. Estos filtros permiten el paso de las frecuencias dentro de ciertas bandas (bandas de corte), bloqueando las frecuencias en otras bandas. Los filtros ideales son selectores de frecuencia que permiten el paso sin distorsión de las componentes espectrales comprendidas en la o las bandas de paso, anulando completamente las

componentes ubicadas fuera de ellas. Entre los filtros selectores de frecuencia más comunes están: pasa bajos (permite el paso de las frecuencias menores que cierta frecuencia  $\omega_c$  y bloquea las mayores), pasa altos (permite el paso de las frecuencias mayores que cierta frecuencia  $\omega_c$  y bloquea las menores), pasa banda (permite el paso de las frecuencias comprendidas entre dos frecuencias  $\omega_1$  y  $\omega_2$ , bloqueando las restantes) y rechaza banda (bloquea las frecuencias comprendidas entre las frecuencias de corte  $\omega_1$  y  $\omega_2$ , dejando pasar las restantes) (Miyara, 2004).

### 3.12.1 Filtro Butterworth

Es un tipo de filtro que puede configurarse para diferentes fines. La respuesta de magnitud de un filtro Butterworth es máximamente plana en la banda de paso y en general monótona. Es excelente para aplicar directamente filtros pasa alto y pasa bajo a la data porque se puede controlar fácilmente el grado del filtro mientras se deja fijo el número de onda central. Si el resonante es observado en la data filtrada, se puede reducir el grado hasta que se esté satisfecho con el resultado. El diagrama que se observa en la Figura 22 muestra la forma de la función del filtro para diferentes grados del filtro ( $n$ ) (GEOSOFTE Oasis montaj, s.f.).

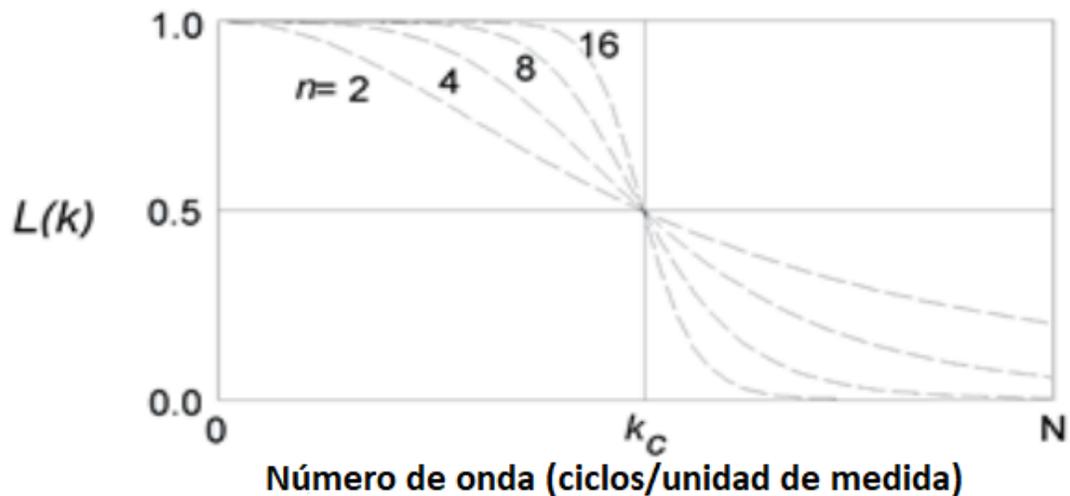


Figura 22. Diagrama de la forma de la función del filtro Butterworth (modificado de GEOSOFTE Oasis montaj, s.f.)

El Butterworth queda representado por la función de transferencia (ecuación 8). Donde  $k$  es el número de onda en ciclos/unidad de medida ( $\omega=2\pi k$ ),  $\omega$  es el número de ondas angular en radianes/unidad de medida,  $k_c$  es el número de onda central del filtro y  $n$  es el grado de la función del filtro Butterworth

$$L(k) = \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k_c}\right)^n} \quad \text{(ecuación 8)}$$

## CAPÍTULO IV

### MARCO METODOLÓGICO

Para desarrollar este trabajo de investigación y cumplir los objetivos propuestos, se utilizó una secuencia metodológica que consistió de tres etapas principales: recopilación de información, procesamiento e interpretación (Figura 23).

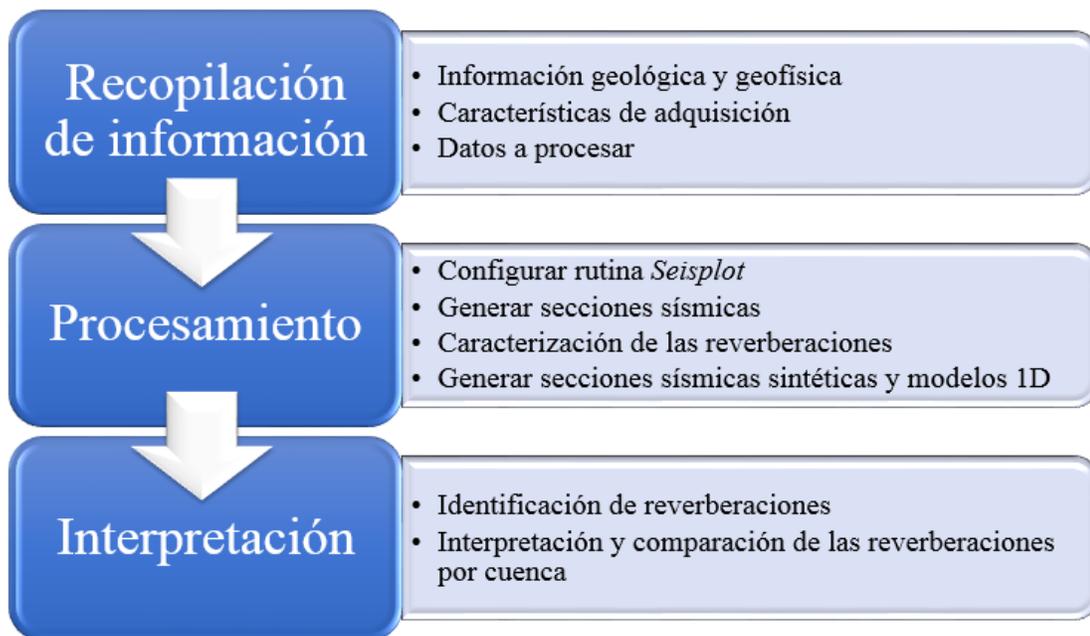


Figura 23. Diagrama de trabajo del marco metodológico

#### 4.1 Recopilación de información disponible

Esta etapa metodológica inicial para la elaboración de este trabajo consistió en la recopilación e integración de información geológica y geofísica preexistente en el área de estudio y sus alrededores. Esto incluye trabajos de investigación, trabajos de grado, artículos científicos y los datos pre-procesados. Además de esto, también se seleccionaron los distintos *softwares* para el procesamiento de datos.

#### **4.1.1 Información geológica y geofísica del área de estudio**

Venezuela es un país donde el petróleo es su mayor fuente de ingreso, y esto ha conllevado a realizar distintos estudios y proyectos de investigación geológicos y geofísicos en las distintas cuencas petrolíferas que se encuentran en el país, para conocer sus rasgos estructurales, geomorfológicos, entre otros. Además de esto, la región se ve afectada por una tectónica compleja que ha generado interés a varios investigadores en el campo de la geociencia. Arnaiz *et al.*, (2011) realizaron un análisis flexural del occidente de Venezuela que abarcó las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo. Audemard y Audemard (2002) hicieron un análisis geodinámico de los Andes de Mérida, los cuales ocasionaron el origen de las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo. Y trabajos como los de Erlich y Barrett (1990) y González de Juana *et al.*, (1980) también destacan entre las investigaciones geológicas y/o geofísicas realizadas en las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo.

#### **4.1.2 Características de adquisición**

El proyecto GIAME constó de tres perfiles principales denominados Andes Norte, Andes Central y Andes Sur, un perfil denominado Burro Negro y tres perfiles de conexión entre los perfiles principales. Estos datos fueron adquiridos por medio de cargas explosivas entre 200 kg y 1600 kg de pentolita y ANFO (*ammonium nitrate fuel oil*) colocadas en pozos de 60 metros de profundidad aproximadamente. Los receptores fueron sismógrafos independientes marca REF-TEK 125<sup>a</sup> (Texan) que registraron los disparos con una tasa de muestreo de 100 muestras/segundo a través de geófonos de componente vertical, con una frecuencia fundamental de 4,5 Hz.; estos estuvieron separados entre 0,5 km y 1 km, dispuestos a lo largo de cada perfil, donde la separación entre cada disparo estuvo entre 20 y 30 km. Todos los datos adquiridos por estos equipos se almacenaron en el formato PASSCALSEG (Montilla, 2015).

Para tener un registro más específico de los detalles de adquisición empleados, se elaboró una tabla en la que se exhiben las coordenadas geográficas y la cantidad de

carga explosiva utilizada en los distintos disparos de adquisición correspondientes a cada perfil y segmento de estudio (Tabla 3).

Tabla 3. Detalles de adquisición de los distintos disparos de adquisición.

Disparo	Perfil	Segmento	Posición geográfica		Carga explosiva (kg)
			Longitud	Latitud	
Barinas	Andes Central	Barinas - Río Apure	-70,3096	8,5573	570
San Silvestre			-70,2168	8,3193	240
Río Apure			-70,1736	7,7993	1190
Santa Bárbara de Barinas	Andes Sur	Santa Bárbara de Barinas - Guasualito	-71,0474	7,6985	680
Río Caparo			-70,8882	7,5927	200
Guasualito			-70,6426	7,2896	1360
Santa Bárbara del Zulia		Santa Bárbara del Zulia - El Vigía	-72,1215	9,0697	800
San Pedro			-71,96208	8,84489	170
El Vigía			-71,7819	8,6066	200

#### 4.1.3 Base de datos a procesar

Los datos sísmicos utilizados para generar las secciones sísmicas y los modelos 1D de reverberaciones fueron proporcionados por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), quienes participaron en la adquisición de los mismos en el proyecto GIAME.

Estos datos proporcionados estaban previamente pre-procesados para que fueran utilizados directamente en la rutina *Seisplot* para la generación de secciones sísmicas. Estos datos cuando fueron adquiridos en campo, se registraron en formato PASSCALSEGY, por lo que se tuvieron que transformar en formato SEG-Y para que pudieran ser leídos por la rutina *Seisplot*.

En esta etapa de pre-procesamiento para la transformación de PASSCALSEGY a SEG-Y se utilizó una rutina de cinco comandos descritos en el manual interno de FUNVISIS (Morales y Gálvez, 2014):

- (a) *arccreate*: mediante este comando se crea una carpeta de nombre *archive*, en la cual se guardarán los datos provenientes de los texans.

- (b) *125\_pas*: con este comando se transforman los datos guardados en la carpeta archive (en formato TRD) a formato dat.
- (c) *arcwrite*: comando que es utilizado para organizar los datos transformados a formato .dat en carpetas por año y por día juliano.
- (d) *arcfetch*: este comando es utilizado para realizar el ajuste de tiempo cero de los disparos, extrayendo las ventanas de tiempo de interés en un archivo con formato rt.
- (e) *rt segy*: por último, se utiliza este comando para transformar los archivos con formato rt a formato sgy. Obteniendo como resultado un archivo en formato SEG-Y por cada traza de la sección.

Además del archivo en formato SEG-Y, la rutina *Seisplot* también requiere un archivo de entrada .txt para que la rutina compile. Este archivo, el cual se denomina “geometría”, debe estar organizado por columnas describiendo las características de cada receptor con respecto al disparo del perfil. El archivo “geometría” fue organizado mediante siete columnas de la siguiente manera: la primera es el serial del Texan, la segunda y tercera son la latitud y longitud del receptor, la cuarta y la quinta son la latitud y longitud del disparo, la sexta es la elevación de cada estación de registro y la séptima es la distancia entre de cada receptor a la fuente (Figura 24).

Geometria: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

04227	10.98170	-71.23072	8.557360	-70.309660	-1	286.576
04357	10.97481	-71.22404	8.557360	-70.309660	1	285.605
04548	10.95931	-71.20920	8.557360	-70.309660	3	283.429
04537	10.95059	-71.20328	8.557360	-70.309660	4	282.299
04555	10.94272	-71.20123	8.557360	-70.309660	4	281.404
04521	10.93484	-71.19634	8.557360	-70.309660	5	280.401
04549	10.92948	-71.18800	8.557360	-70.309660	7	279.527
04538	10.91971	-71.18440	8.557360	-70.309660	9	278.377
04553	10.91297	-71.18182	8.557360	-70.309660	12	277.579
04536	10.90415	-71.17117	8.557360	-70.309660	14	276.262
04552	10.89831	-71.16407	8.557360	-70.309660	13	275.387
04377	10.89198	-71.15304	8.557360	-70.309660	15	274.318
04529	10.88618	-71.14296	8.557360	-70.309660	18	273.342
04501	10.88185	-71.13145	8.557360	-70.309660	19	272.469
04353	10.87485	-71.12322	8.557360	-70.309660	21	271.440
04512	10.86772	-71.11810	8.557360	-70.309660	21	270.511
04482	10.86023	-71.11231	8.557360	-70.309660	22	269.520
04460	10.85286	-71.10554	8.557360	-70.309660	26	268.507
04572	10.83780	-71.09638	8.557360	-70.309660	28	266.604
04490	10.82884	-71.09254	8.557360	-70.309660	30	265.531
04492	10.82007	-71.08914	8.557360	-70.309660	31	264.492
04488	10.81164	-71.08625	8.557360	-70.309660	34	263.507
04551	10.80515	-71.08036	8.557360	-70.309660	36	262.619

Figura 24. Archivo "geometría" para la rutina *Seisplot*

## 4.2 Procesamiento

La siguiente etapa del marco metodológico formó parte de una rutina de procesamiento, donde principalmente se tuvo que configurar la rutina *Seisplot* para realizar el *picking* de los tiempos de llegada de las reverberaciones, generar las secciones sísmicas de cada disparo, realizar la caracterización de las reverberaciones mediante el cálculo de sus velocidades y la elaboración de mapas según el número de reverberaciones seleccionados en cada disparo y la elaboración de modelos 1D de las reverberaciones en cada cuenca de estudio.

#### 4.2.1 Configurar rutina *Seisplot*

La rutina de procesamiento *Seisplot* es un código rápido, eficiente y flexible que permite al usuario el manejo de datos de sísmica de gran ángulo a través de varios pasos en una interfaz humano-máquina (Arnaiz-Rodríguez *et al.*, 2014). Este código compila mediante el *software* de Matlab 2012 y sus versiones más actualizadas. Esta rutina de procesamiento permite realizar el filtrado de los datos, presentación de la sección sísmica, la selección de los tiempos de llegada (*picks*) de las fases corticales como: Pg, Pmp, Pn y Pi, y finalmente exportar la sección sísmica en formato *PostScript* (.ps) de alta resolución y los tiempos seleccionados en un archivo de texto tx.in para utilizarlo posteriormente en el *software* RAYINVR, el cual se utiliza para realizar un modelo de velocidades 2D basado en el algoritmo de trazado de rayos. Sin embargo, para este trabajo se necesitan hacer más de 20 selecciones de tiempos de llegada diferente (dependiendo del caso), correspondientes al número de reverberaciones observadas en las secciones sísmicas y exportar la sección interpretada en formato *PostScript* (.ps) y las selecciones en archivos de texto tipo ASCII, para luego calcular las velocidades aparentes correspondientes a cada reverberación. Por lo tanto, se agregó un paso nuevo en la rutina *Seisplot*, en la que el usuario puede elegir si desea seleccionar “fases corticales” o “múltiples reflexiones” (reverberaciones). Si el usuario elige “fases corticales”, la rutina continúa como el código original, pero si elige “múltiples reflexiones”, la rutina permite hacer hasta un máximo de 40 selecciones de tiempos de llegada diferentes (“*picking*”) y exportarlas en unos archivos ASCII (.txt) indicando la distancia y el tiempo en que fue hecho cada *pick*, con su respectiva sección sísmica generada (Figura 25).

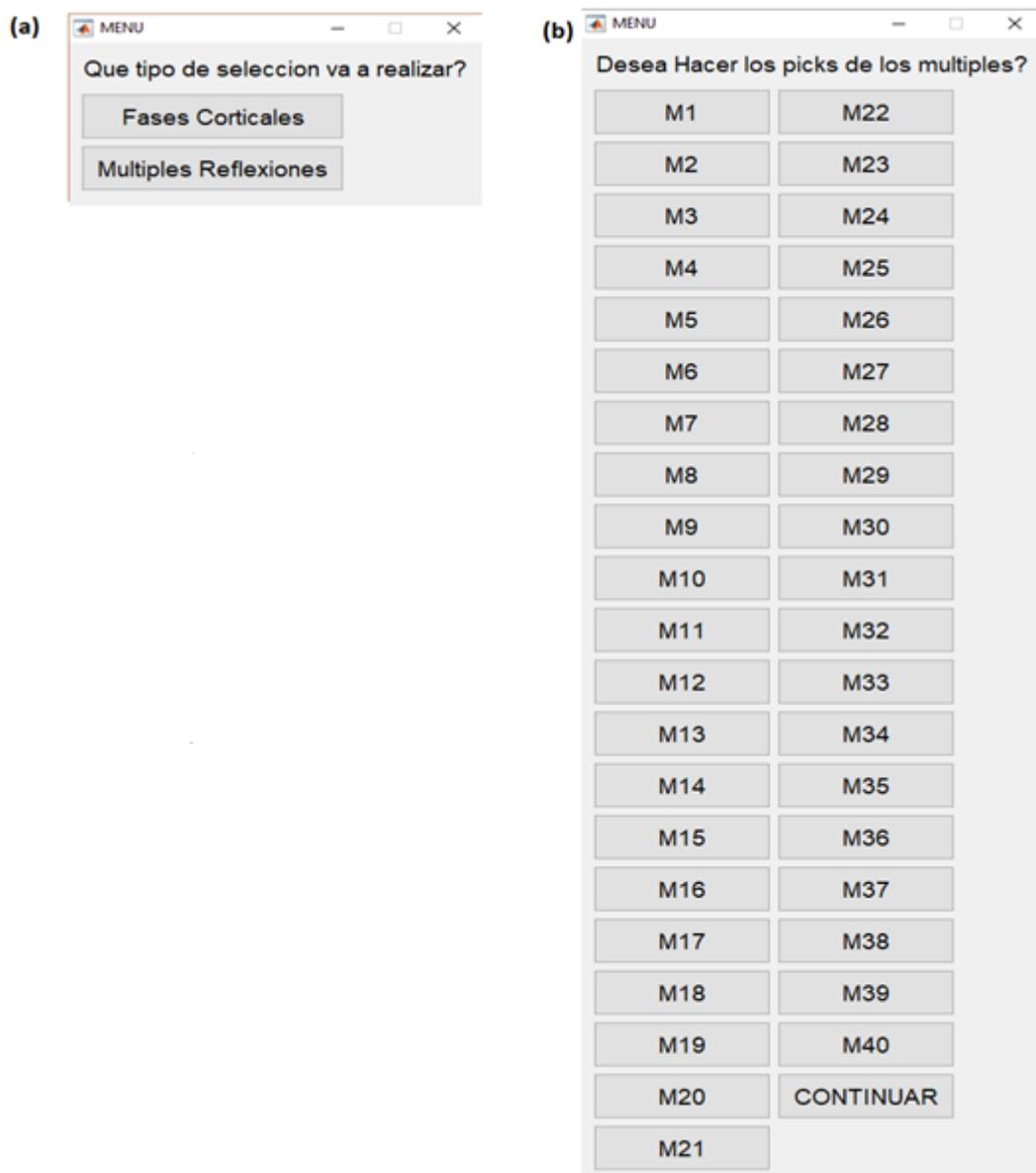


Figura 25. Configuración de la rutina *Seisplot*. (a) Ventana que permite escoger el tipo de selección. (b) Ventana que permite la selección de hasta 20 múltiples.

#### 4.2.2 Secciones sísmicas

La rutina de procesamiento *Seisplot* tiene un conjunto de herramientas que se pueden utilizar para el manejo de los datos y poder generar secciones sísmicas de tal manera como prefiera el usuario. Generalmente esta rutina se ha utilizado para generar secciones sísmicas filtradas de tal manera que facilitara la selección de las distintas

fases corticales que presentaban las zonas de estudio. Para este trabajo de investigación se generaron secciones sísmicas en las que se pudieran observar la mayor cantidad de reverberaciones posibles para su selección. En la Tabla 4 se pueden observar los parámetros que se utilizaron en la rutina *Seisplot* para generar secciones sísmicas acorde a los objetivos planteados.

Tabla 4. Parámetros de la rutina *Seisplot* aplicados sobre los datos

<b>Funciones de la rutina <i>Seisplot</i> aplicadas sobre los datos</b>										
Selección de sistema de coordenadas	Geográficas (grados)									
Datos iniciales	Fracción de trazas a plotear					Tasa de muestreo				
	Velocidad de reducción					Factor de normalización				
Selección del filtro	Filtro Butterworth Pasabanda									
Frecuencia y grado del filtro Butterworth	Frecuencia menor					Frecuencia mayor				
	Grado									
Selección de tipo de representación (ploteo)	Wiggle + Variable área (blanco y negro)									
Límites de la sección	Offset min. (xmin, km)					Tiempo de reducción min. (s)				
	Offset máx. (xmax, km)					Tiempo de reducción máx. (s)				
Editar la sección	Limpieza de memoria					Cargar picks anteriores				
	Eliminación de trazas de la sección					Dibujar líneas guías				
Tipo de selección	Múltiples reflexiones					Fases corticales				
Selección de los múltiples	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M27	M28	M29	M30
	M31	M32	M33	M34	M35	M36	M37	M38	M39	M40
	Pg		Pmp			Pn			Pi	
Exportar resultados	Exportar sección y los datos									

Entre los parámetros definidos para generar las secciones sísmicas, se puede mencionar que estos variaron en función a obtener secciones sísmicas con una relación señal-ruido óptima para visualizar e interpretar la mayor cantidad de reverberaciones posibles (Figura 26). La rutina de *Seisplot* ofrece tres tipos de filtros: filtro Butterworth Pasabanda, Gaussiano y FIR Pasabanda. Es importante destacar que al momento de aplicar el filtro en secciones sísmicas donde hay que señalar reverberaciones, se tiene que aplicar un filtro de paso bajo que pueda disminuir el ruido, pero que permita la visualización de las reverberaciones. Al final se escogió el filtro Butterworth Pasabanda de grado 2 a 4, con un rango de frecuencias entre 1 y 8 Hz., dependiendo de la sección sísmica. Para la selección de las reverberaciones asociadas al paquete sedimentario se utilizó “Múltiples reflexiones en el tipo de selección. Para la selección de las reverberaciones asociadas a Pg se utilizó “Fases corticales” en el tipo de selección, solo para poder diferenciar unas con respecto a las otras.

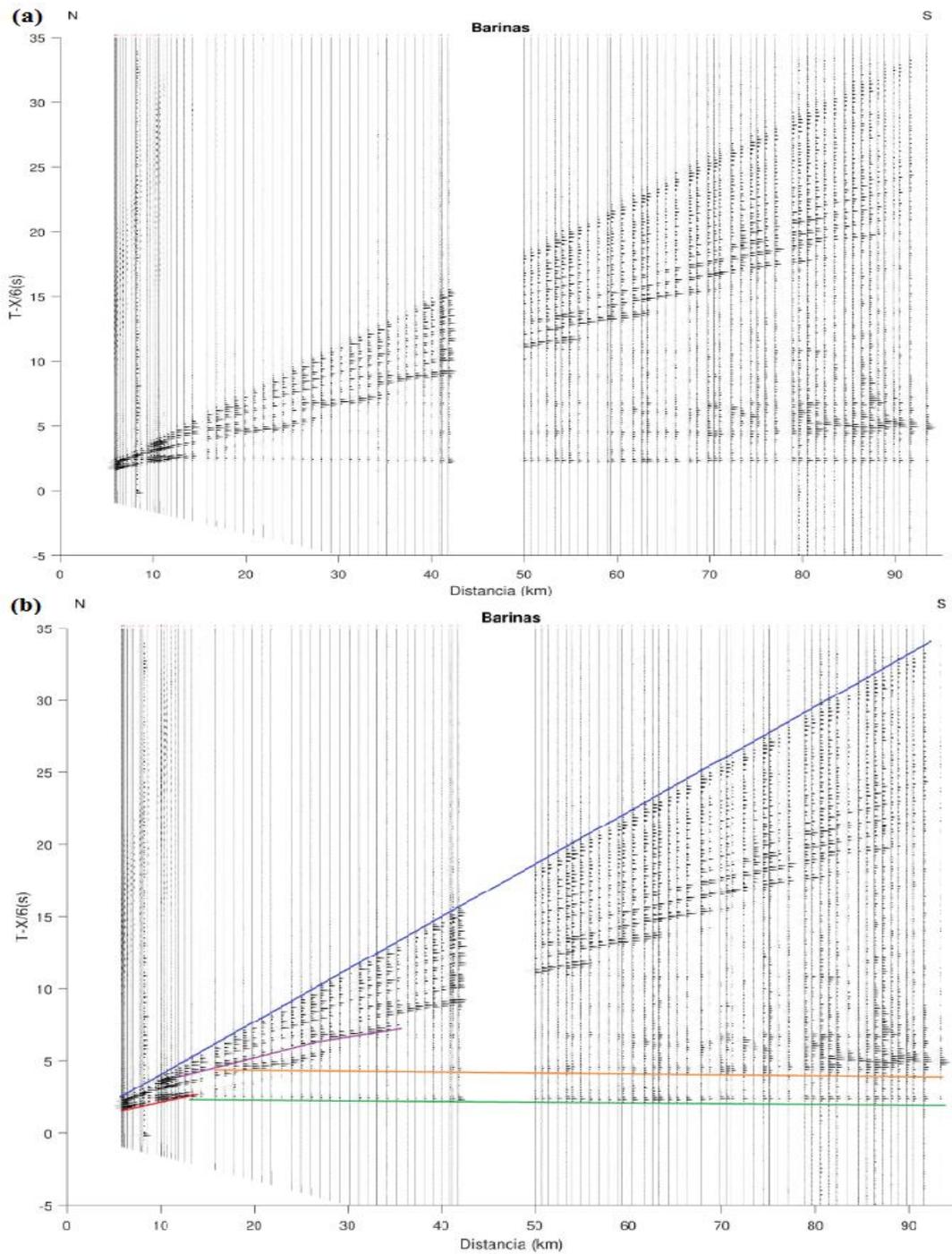


Figura 26. Sección sísmica del disparo Barinas con una relación señal-ruido óptima para observar reverberaciones. (a) Sección sísmica sin editar. (b) Sección sísmica con los tipos de onda indicadas. Línea roja: onda directa. Línea verde: fase Pg. Línea azul: ondas superficiales. Línea naranja: reverberación asociada a la fase Pg. Línea morada: reverberación asociada al paquete sedimentario.

### 4.2.3 Caracterización de las reverberaciones

En esta sección se desarrollaron detalles de las reverberaciones que se observaron en las cuencas Barinas – Apure y Maracaibo. Se elaboró una tabla en la que se indicó el número de reverberaciones por disparo y el promedio de las mismas por cada cuenca. Además de esto, se elaboraron dos mapas 2D mediante el *software Oasis Montaj*, en los que se representó la distribución de las reverberaciones de cada cuenca según el número de reverberaciones detectadas en cada disparo. Para generar los mapas cuantitativos de reverberaciones por cuenca, se tuvieron que exportar las coordenadas geográficas y el número de reverberaciones observadas de cada disparo al *software de Oasis Montaj*, y colocarlos en el eje x (longitud), el eje y (latitud) y el eje z (número de reverberaciones). Estos mapas facilitaron la etapa interpretación al poder tener una vista gráfica de la posible distribución y tendencia de las reverberaciones en las cuencas de estudio.

Para poder interpretar de manera más detallada la caracterización de las reverberaciones, se analizaron las velocidades promedio aparentes de cada reverberación seleccionada. Para esto se elaboró un programa llamado “Ondas sísmicas” mediante el *software de Lazarus*, el cual es una herramienta de desarrollo rápido de aplicaciones. La interfaz del programa exhibe un botón para ingresar los datos de entrada, un memo a la izquierda que exhibe las velocidades obtenidas, un memo a la derecha que muestra las velocidades obtenidas en orden de menor a mayor, y un promedio de las velocidades aparentes en la esquina inferior derecha (Figura 27).

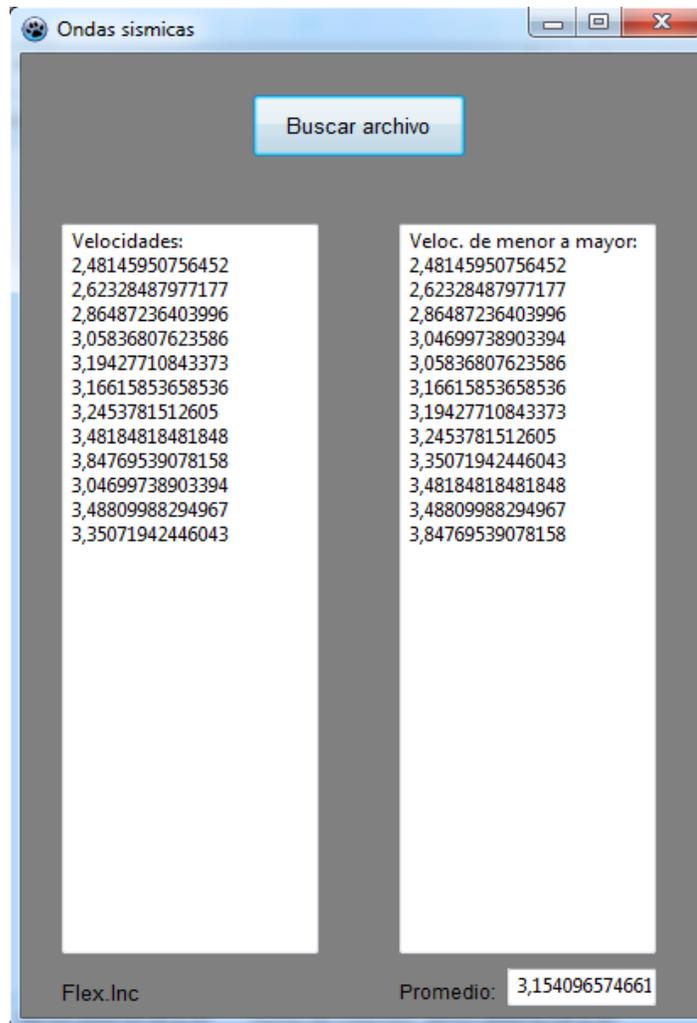


Figura 27. Interfaz del programa de Ondas sísmicas

Mediante el botón de “Buscar archivo” del programa, se selecciona el archivo de salida “ASCII” generado por *Seisplot*, el cual indica la distancia y el tiempo de cada *pick*. Hay que destacar que, debido a que la geometría de las reverberaciones es curva, se realizó el programa para que pudiera calcular la velocidad de cada tres trazas (*picks*) para luego generar un promedio de las mismas (ecuación 9) y así obtener la velocidad promedio aparente de cada reverberación (Figura 28).

Al final se elaboró una tabla con los datos de velocidad promedio aparente de cada reverberación por disparo.

$$\sum V_{promedio} = \frac{V_{1-1} + V_{1-2} + \dots + V_n}{n} \quad (\text{ecuación 9})$$

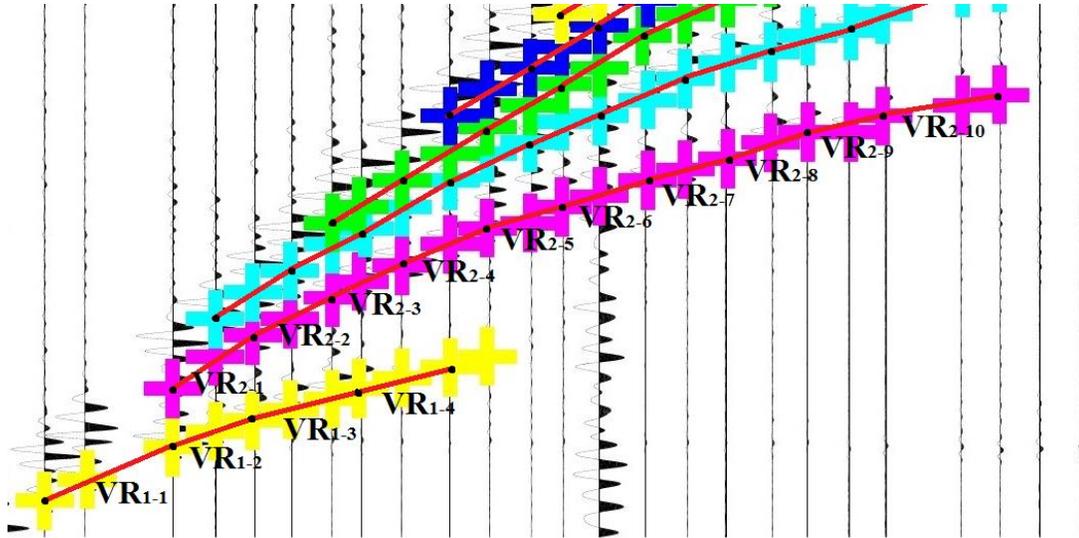


Figura 28. Representación gráfica del cálculo de las velocidades aparentes de cada reverberación por cada tres puntos seleccionados (*picks*).

#### 4.2.4 Secciones sísmicas sintéticas y modelos 1D

Para generar los modelos 1D de reverberaciones, primero se tuvieron que generar secciones sísmicas sintéticas para poder observar la propagación de las ondas. Se utilizó el módulo de *Sureflpsvsh* de *Seismic Un\*x*, debido a que este permite modelar todo el tren de ondas. Se generó un guion Shell Script como archivo de entrada, en el que aparecen una serie de parámetros que fueron modificados para que las secciones fueran acordes con los parámetros de adquisición y procesamiento de datos y los datos de la geología.

Entre los parámetros a modificar, estaban los siguientes:

- `int_type`: calcula la integración de la lentitud (=1 Trapezoidal o =2 Esquema de Filon)
- `wtype`: indica el tipo de onda a calcular en el modelado (=1 PSV o =2 SH)
- `stype`: indica el tipo de fuente a seleccionar (=1 Energía producto de una Falla o =2 Explosivos)

- wfield: indica el campo de onda (=1 desplazamiento, =2 velocidad o =3 aceleración)
- wavelet\_type: indica el tipo de ondícula (=1 Spike, =2 Ricker o =3 Akb)
- fpeak: el valor de la frecuencia fundamental de la ondícula (Hz)
- nlayers: indica el número de capas presentes en el modelo.
- verbose: indica el parámetro para mostrar los resultados procesados. (=0 no se muestran los resultados, =1 los resultados se muestran en pantalla, =2 los resultados se guardan en un archivo, =3 los resultados se muestran en pantalla y se guardan en un archivo.
- decay: indica el factor de decaimiento, para evitar el aliasing temporal.
- red\_vel: indica el factor aplicado para reducir la velocidad de onda P.

Parámetros generales relacionados con el tiempo, *offset*, frecuencia y rayo.

- tsec: indica el tiempo de grabación en el sismograma (s).
- dt: indica el intervalo de tiempo de muestreo.
- nt: indica el número de muestras en tiempo.
- bx: indica el *offset* asignado a la primera traza (km).
- fx: indica el *offset* asignado a la última traza (km).
- nx: indica el número total de las trazas (valor máximo en el eje x).
- dx: indica el espaciado entre trazas (km).
- nw: indica el número de frecuencias a procesar.
- nf: indica el número de frecuencias a imprimir en pantalla.
- bp: indica el valor del parámetro de rayo más lento para los sismogramas (s/km).
- p2w: indica el valor de parámetro de rayo máximo (s/km).

Parámetros generales que definen las características de la fuente sísmica

- lsource: indica el tope de la capa en la que la fuente está localizada.
- stype: indica el tipo de fuente (=2 explosivo).
- h1: indica la parte lineal vertical de la fuente.

- m0: indica el momento sísmico.
- m1: [1][1] componente del tensor de momento.
- m2: [1][2] = [2][1] componente del tensor de momento.
- m3: [2][2] componente del tensor de momento.

Parámetros generales que definen las características de los geófonos.

- nor: indica las profundidades en la que los geófonos fueron colocados (>1 en caso de VSP).
- lobs: indica el tope de la capa en la que fueron colocados los geófonos.

Parámetros generales que definen el modelo estratificado. Cada uno de los valores colocados debe coincidir con número de capas del modelo, y deben estar separados mediante comas (,).

- cl: indica el vector de velocidades de onda P correspondientes a cada capa del modelo (km/s).
- ct: indica el vector de velocidades de onda S correspondientes a cada capa del modelo (km/s).
- ql: indica el vector que presenta los valores de Q-Compresional correspondientes a cada capa del modelo (atenuación).
- qt: indica el vector que presenta los valores de Q-Cizalla correspondientes a cada capa del modelo (atenuación).
- rho: indica el vector de densidades correspondientes a cada capa del modelo (gr/cc).
- t: indica el vector de espesores correspondientes a cada capa del modelo (km).

Una vez definidos los parámetros, se procedió a ejecutar el programa de *Sureflpsvsh*. Luego de haberse creados los archivos de salida se procedió a transformarlos de formato *Seismic Un\*x* (.SU) a formato *Segy* (.sgy) para que estos pudieran ser utilizados en un *software* de procesamiento sísmico como *SeiSee*. De esta manera se

podieron procesar las secciones sísmicas sintéticas para que se pudiera analizar la distribución de las reverberaciones.

```

67
68 # Ejecuta sureflpsvsh con los argumentos definidos
69
70 sureflpsvsh fs=$fs decay=$decay flt=$flt lsource=$lsource nw=$nw nor=$nor \
71 tsec=$tsec dt=$dt lobs=$lobs bx=$bx fx=$fx dx=$dx nx=$nx \
72 pw1=$pw1 pw2=$pw2 pw3=$pw3 pw4=$pw4 p2w=$p2w \
73 stype=$stype h1=$h1 h2=$h2 m0=$m0 m1=$m1 m2=$m2 m3=$m3 delta=$delta \
74 cl=$cl ct=$ct ql=$ql qt=$qt rho=$rho t=$t nlayers=$nlayers \
75 wtype=$wtype wfield=$wfield red_vel=$red_vel nf=$nf \
76 wavelet_type=$wavelet_type verbose=$verbose \
77 nt=$nt fpeak=$fpeak wfr=$wfr "$nw" "$nx" "$dx" "$p2w".su wfz=$wz "$nw" "$nx" "$dx" "$p2w".su
78
79 # Imprimiendo en pantalla los sismogramas sintéticos obtenidos para la
80 # componente radial y vertical
81
82 suximage < $wfr "$nw" "$nx" "$dx" "$p2w".su title="PSV Comp. Radial 5 capas" perc=99.8 \
83 label1="Tiempo (s)" xbox=600 label2="Nro. de Trazas" titlesize=10 &
84 suximage < $wfz "$nw" "$nx" "$dx" "$p2w".su title="PSV Comp. Vertical 5 capas" perc=99.8 \
85 label1="Tiempo (s)" xbox=600 label2="Nro. de Trazas" titlesize=10 &
86
87 # Se crea el header de los disparos sintéticos
88
89 segyhdrs < $wfr "$nw" "$nx" "$dx" "$p2w".su bfile=$wfr$nx$dx.bhead hfile=$wfr$nx$dx.ehead
90 segyhdrs < $wfz "$nw" "$nx" "$dx" "$p2w".su bfile=$wfz$nx$dx.bhead hfile=$wfz$nx$dx.ehead
91
92 # Convertimos el archivo .su en .segy
93 # Componente radial
94
95 # Componente radial
96 segywrite < $wfr "$nw" "$nx" "$dx" "$p2w".su tape=$wfr "$nw" "$nx" "$dx" "$p2w".segy \
97 bfile=$wfr$nx$dx.bhead hfile=$wfr$nx$dx.ehead endian=0
98
99 # Componente vertical
100 segywrite < $wfz "$nw" "$nx" "$dx" "$p2w".su tape=$wfz "$nw" "$nx" "$dx" "$p2w".segy \
101 bfile=$wfz$nx$dx.bhead hfile=$wfz$nx$dx.ehead endian=0
102

```

Jnix script file length: 4.836 lines: 102 Ln: 36 Col: 27 Sel: 0 | 0 Unix (LF) ANSI INS

Figura 29. Parte del Shell Script utilizado para el modelado 1D, utilizando el *software Notepad++*

En la Figura 30 se muestra como ejemplo el componente radial y vertical de una sección sintética estratificada de dos capas, en el que se desplazan los múltiples y las primeras llegadas de ondas P-SV generadas.

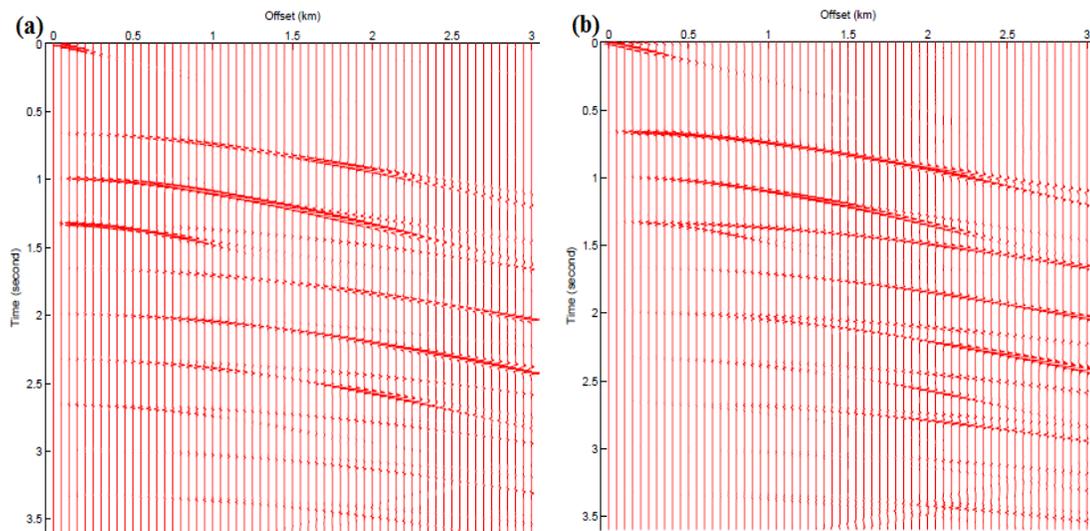


Figura 30. Desplazamiento de múltiples y primeras llegas de ondas P–SV en un modelo estratificado de dos capas. (a) componente radial. (b) componente vertical (modificado de Ma, *et al.*, 2004).

Una vez generadas las secciones sísmicas sintéticas, se procedió a generar los modelos 1D de velocidades en cada disparo a partir de la identificación de las reverberaciones. Para esto se utilizaron parte de los datos que fueron utilizados para la generación de secciones sintéticas. Se graficó la velocidad de onda P y S y densidad con respecto a la profundidad de las capas empleadas en la sección sísmicas sintética.

En general, para las secciones sintéticas se utilizó el módulo de *Sureflpsvsh* de *Seismic Un\*x*. Para esto fue necesario generar un Shell Script con una serie de parámetros y valores para la elaboración del modelo. Estos parámetros están relacionados con ciertos datos de adquisición, procesamiento y valores de velocidades P y S, densidad y espesor de cada capa de la cuenca. Para la obtención de los parámetros y valores utilizados en este trabajo especial de grado, se utilizaron varios trabajos de investigación como referencia. Medina (2017) expone un modelo de velocidades de onda P a lo largo del perfil Andes Sur, con respecto a las profundidades de capa de las cuencas Barinas - Apure y Maracaibo. Con estas velocidades de onda P, se pudieron obtener las velocidades de onda S mediante la relación de  $V_p/V_s = 1,724$  propuesta por Niu *et al.*, (2007). A partir de los mapas y

modelos gravimétricos que propone González (2009) se obtuvieron las profundidades y buzamientos del basamento en la cuenca Barinas-Apure. Para estimar las profundidades máximas de espesores de sedimentos, se utilizó el mapa estructural del bloque de Maracaibo propuesto por Arnaiz-Rodríguez y Audemard (2014). También se utilizó de referencia el trabajo de Medina (2017) para determinar la proporción de los espesores de cada capa de las cuencas de estudios. Mediante el trabajo de Celis (2017), se pudieron obtener las densidades promedio de cada una de las capas de las cuencas. Finalmente, los trabajos de López (2013) y Rodríguez (2012) se utilizaron como referencia al momento de realizar los Shell Script.

Para la elaboración de los modelos 1D, se utilizaron los valores de velocidad de onda P y S y densidad con respecto a las profundidades de cada disparo. Estos parámetros fueron variando hasta que las secciones sísmicas sintéticas coincidieran con las secciones sísmicas generadas con el programa *Seisplot*.

### **4.3 Interpretación**

Una vez generadas las secciones sísmicas de los distintos perfiles de estudio, se procedió a iniciar una etapa de interpretación. En esta etapa se identificaron y contabilizaron las distintas reverberaciones que se observaron en las secciones sísmicas para poder generar un archivo de texto con las primeras llegadas seleccionadas (*picking*). Se caracterizaron y compararon las reverberaciones entre las cuencas de estudios, identificando cuáles cuencas presentaron un mayor o menor número de estos múltiples reflexivos. Se propusieron modelos 1D de velocidades a partir de la identificación de reverberaciones en las distintas cuencas para poder observar y analizar su comportamiento a medida que se desplazaban a través del medio, y así poder proponer las condiciones que generan reverberaciones en cuencas sedimentarias.

#### **4.3.1 Identificación de reverberaciones**

Mediante el uso de la rutina *Seisplot* se pudo hacer la selección (*picking*) de las primeras llegadas de las reverberaciones (múltiples) en las secciones sísmicas

procesadas. La rutina de *Seisplot* permite hacer acercamientos y dibujar líneas guías sobre las secciones sísmicas; estas fueron utilizadas para marcar la tendencia de las reverberaciones y así poder disminuir la confusión e incertidumbre al momento de seleccionarlas. Una vez finalizada la selección, la rutina permite exportar la sección sísmica interpretada para su posterior análisis y el *picking* realizado (Figura 31).

Al final de la interpretación se elaboraron tablas de datos mediante el *software* de Excel, en las que se especificaron los valores finales del procesamiento y el número de reverberaciones sísmicas observadas por cada sección.

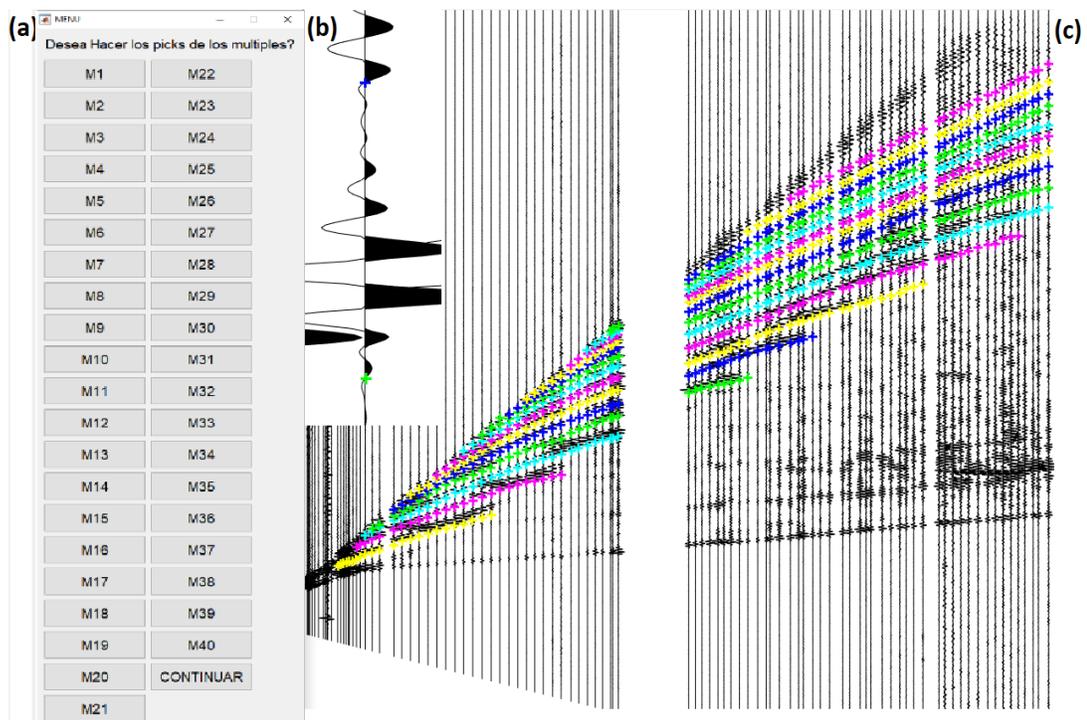


Figura 31. Ejemplo en la metodología de selección de tiempos de llegada de las reverberaciones (a) Ventana de control de selección. (b) Ondícula con acercamiento y selección señalada. (c) Sección sísmica de Barinas interpretada.

### 4.3.2 Interpretación y comparación de las reverberaciones por cuenca

En esta etapa de interpretación se analizaron las velocidades, distribución y geometría de las reverberaciones observadas en cada cuenca. Para las velocidades de cada cuenca se tomaron en cuenta las tablas de velocidades aparentes de cada reverberación que se generaron por medio del programa “Ondas sísmicas”; se compararon estos valores con respecto a otros disparos y entre las dos cuencas. La

interpretación de la distribución de las reverberaciones se hizo mediante el análisis de los mapas 2D generados en la etapa de caracterización; se comparó un mapa con respecto al otro y se pudo determinar la tendencia de las reverberaciones según su cantidad seleccionada en cada cuenca. Finalmente, para poder determinar la geometría de las reverberaciones seleccionadas, se compararon las secciones sísmicas generadas con el programa *Seisplot* de Matlab con respecto a las secciones sísmicas sintéticas generadas con el módulo de *Sureflpsvsh* de *Seismic Un\*x* de cada disparo. Se cambiaron los parámetros de entrada para las secciones sísmicas sintéticas hasta que estas coincidieran con las primeras secciones sísmicas donde están seleccionadas las reverberaciones. De esta manera se comparó la distribución de las reverberaciones de cada sección (Figura 32). Una vez determinado los parámetros para que las secciones sísmicas coincidieran, se utilizaron estos para la elaboración de los modelos 1D de velocidades de onda P y S y densidad con respecto al espesor de sedimentos de cada disparo y poder relacionarlos con la geología de las cuencas.

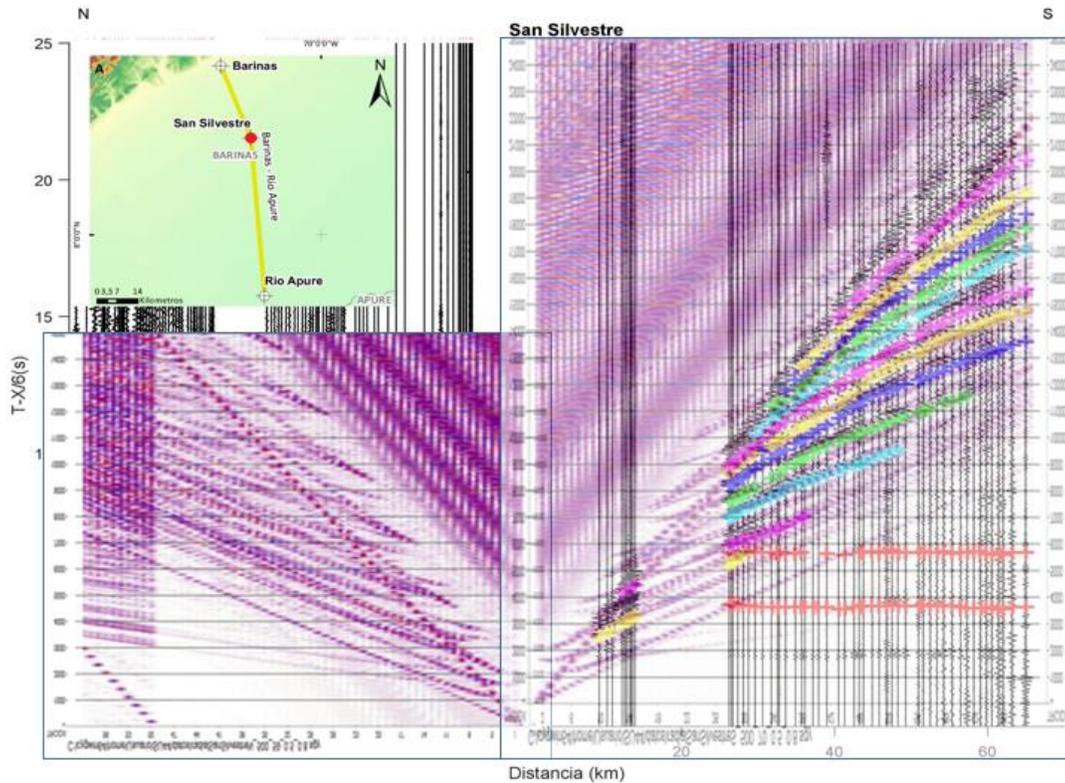


Figura 32. Comparación de las secciones sísmicas con las reverberaciones seleccionadas con respecto a las secciones sísmicas sintéticas.

## **CAPÍTULO V**

### **RESULTADOS Y ANÁLISIS**

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos a fin de cumplir con los objetivos planteados anteriormente en el primer capítulo, luego de ser aplicada la metodología mencionada en el capítulo anterior. Se presentarán a continuación, las secciones sísmicas interpretadas de cada disparo, con su respectiva caracterización y comparación entre las mismas. Los modelos 1D de las reverberaciones observadas en cada cuenca. Y la propuesta de las condiciones que pueden generar reverberaciones en cuencas sedimentarias.

Para el estudio de la cuenca Barinas-Apure, se analizaron los disparos de Barinas, San Silvestre y Río Apure del perfil Andes Central, y Santa Bárbara de Barinas, Río Caparo y Guasdalito del perfil Andes Sur. Para el estudio de la cuenca de Maracaibo se analizaron los disparos de Santa Bárbara del Zulia, San Pedro y El Vigía del perfil Andes Sur. En la Figura 33 se puede apreciar la distribución de los perfiles, segmentos y disparos antes mencionados sobre las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo. Este mapa servirá de base para tomar como referencia la ubicación de las secciones sísmicas y modelos 1D generados en este capítulo.

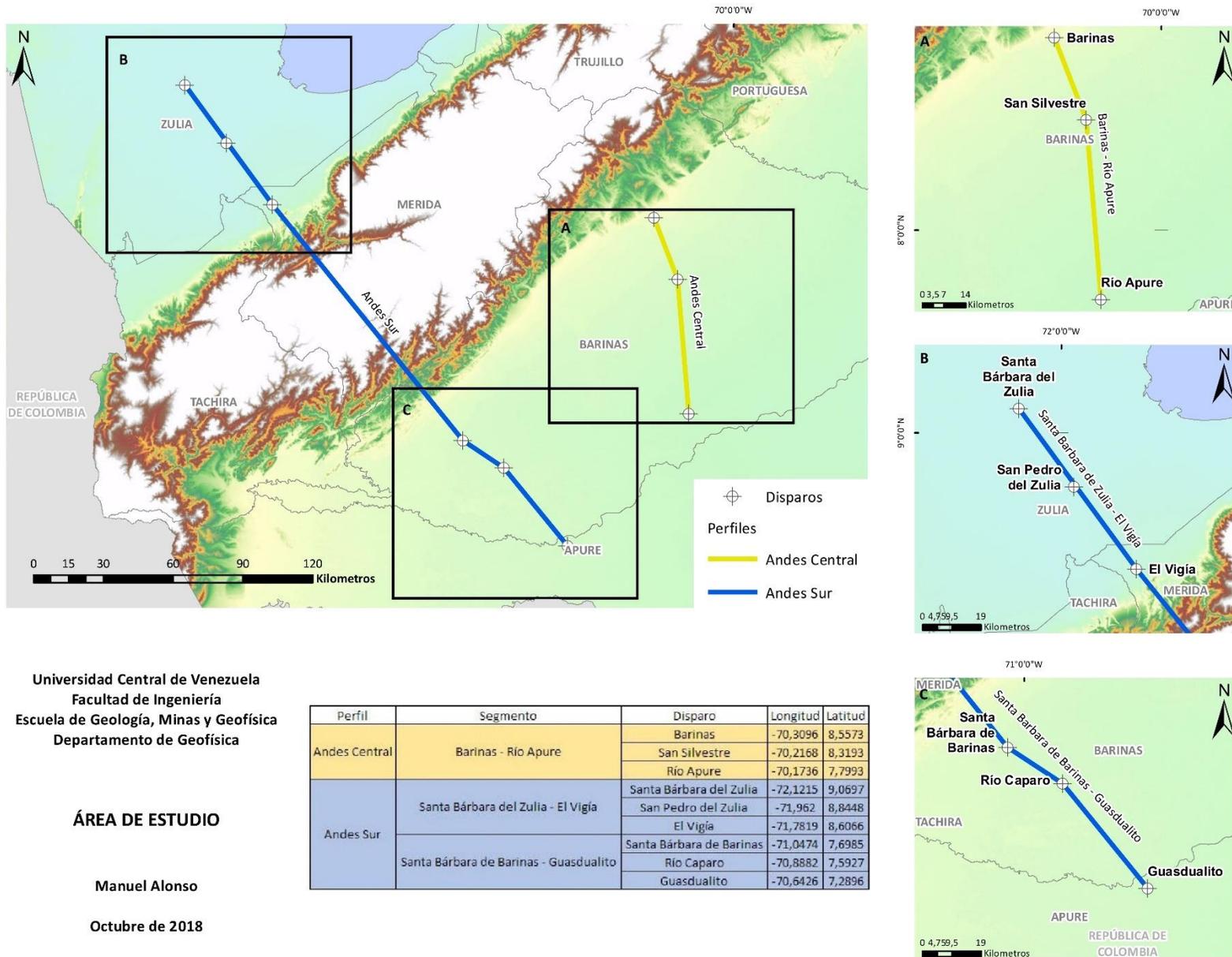


Figura 33. Mapa del área de estudio, señalando la ubicación de los perfiles, segmentos y disparos analizados sobre las cuencas Barinas – Apure y Maracaibo. (Mapa A) Segmento Barinas – Río Apure. (Mapa B) Segmento Santa Bárbara del Zulia – El Vigía. (Mapa C) Segmento Santa Bárbara de Barinas – Guasqualito.

### 5.1 Secciones sísmicas interpretadas

En líneas generales se pudo observar que la longitud de propagación de cada reverberación aumenta a medida que aumenta la distancia entre fuente y receptor (*offset*) hasta un punto en que se dispersaban no se podían observar más. Para todas las secciones sísmicas se utilizó una velocidad de reducción de 6 km/s y un filtro Butterworth Pasabanda de bajo grado (2 - 4). Las secciones sísmicas no interpretadas se pueden observar en el anexo A. En la Figura 34 se puede observar una representación de la trayectoria de propagación de hasta 2 reverberaciones asociadas al paquete sedimentario y a la fase Pg, en un modelo simple de 3 capas que incluye el basamento. La primera capa representa una capa de bajas velocidades en la que se generan las múltiples reflexiones. La segunda capa representa un espesor de sedimentos mejor consolidados. Y la tercera capa representa el basamento de la cuenca donde se generan también las múltiples reflexiones.

Para tener una idea de las profundidades y buzamientos complejos del basamento en la cuenca Barinas-Apure, se utilizó de referencia las profundidades del tope de basamento propuesto por González (2009). Este se hizo en base a pozos, datos gravimétricos, magnéticos, sísmica 2D y geología. Sobre este se colocó la ubicación de cada uno de los disparos de estudio sobre la cuenca Barinas – Apure mediante cruces rojas, para así poder saber la profundidad aproximada del basamento pre – Cretácico en cada uno de los disparos (Figura 35). Para las profundidades y buzamiento del basamento de la cuenca de Maracaibo solo se utilizó de referencia el mapa de espesores sedimentarios propuesto por Arnaiz-Rodríguez y Audemard (2014) Figura 48

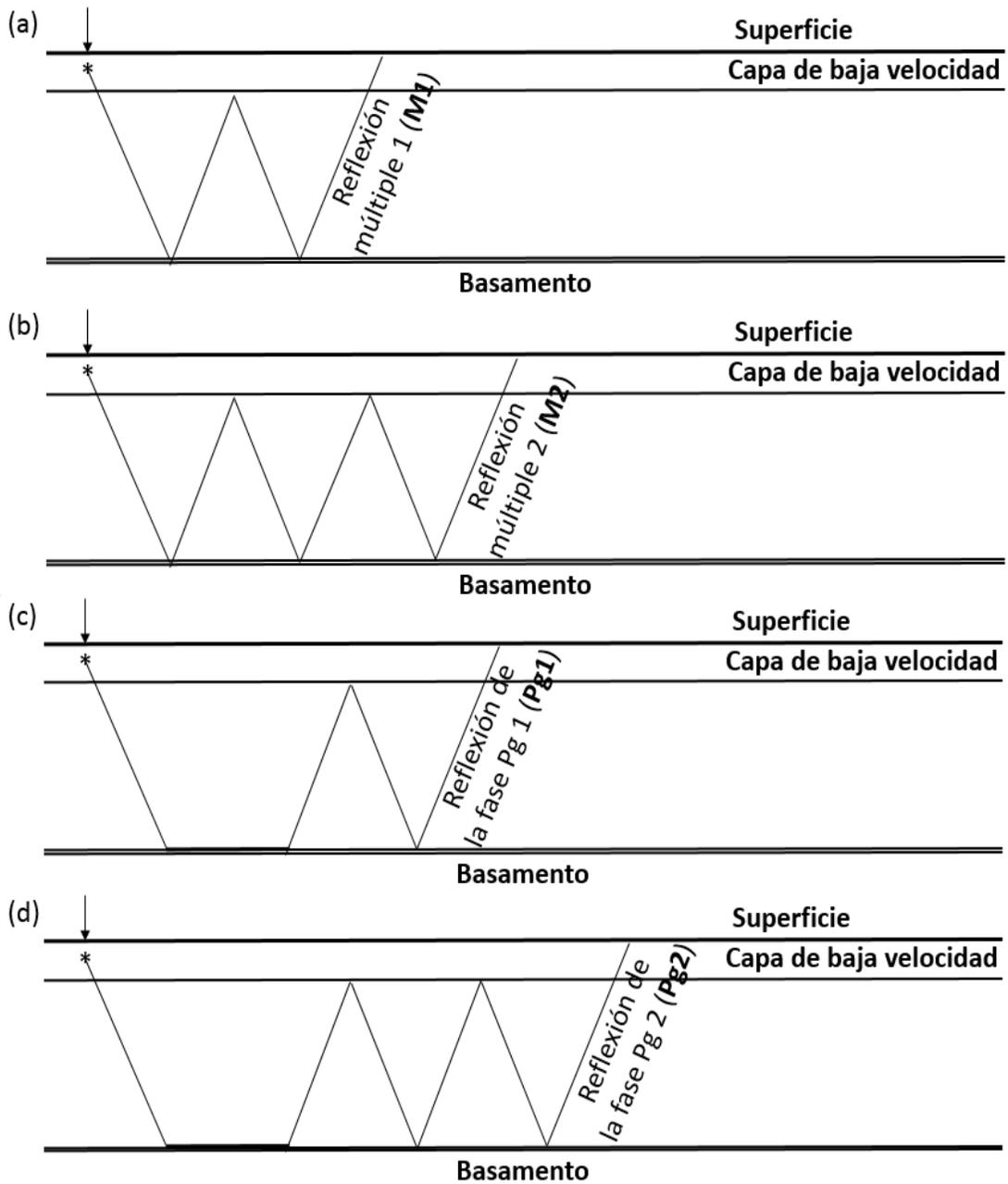


Figura 34. Representación gráfica de la trayectoria de propagación de las múltiples reflexiones observadas en las cuencas. (a) Primera reverberación asociada al paquete sedimentario. (b) Segunda reverberación asociada al paquete sedimentario. (c) Primera reverberación asociada a la fase Pg. (d) Segunda reverberación asociada a la fase Pg.

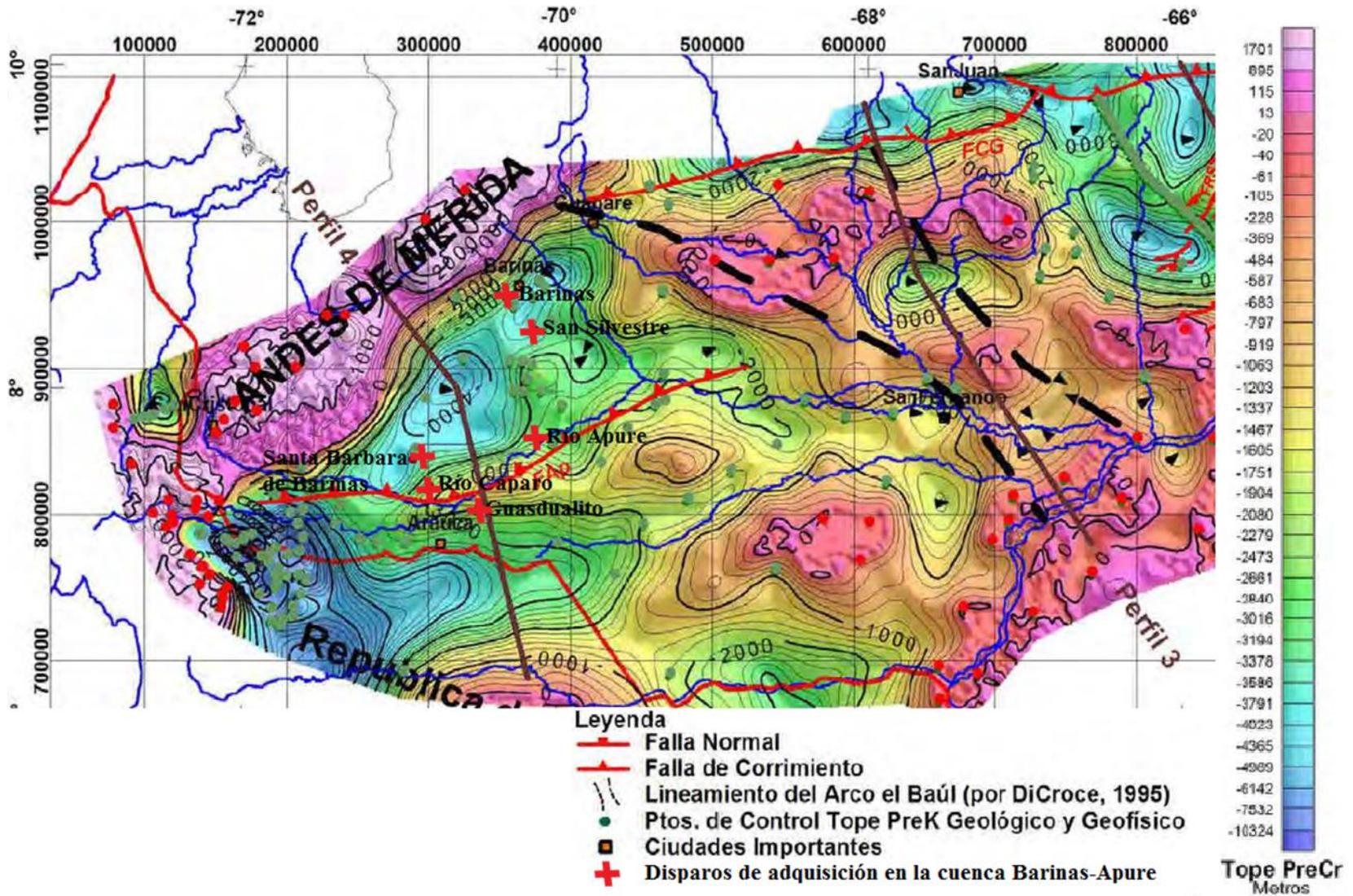


Figura 35. Profundidades del tope del basamento pre - Cretácico en la cuenca Barinas - Apure (modificado de González, 2009)

## 5.1.1 Cuenca Barinas – Apure

### 5.1.1.1 Disparo de Barinas

Los datos registrados para elaborar la sección sísmica de Barinas fueron de buena calidad. Esto facilitó el *picking* de las reverberaciones observadas (Figura 36), disminuyendo de esta manera el grado de incertidumbre. Se pudieron identificar un total de 17 reverberaciones simples asociadas al paquete sedimentario entre los 11 y 91 km hacia el sur con respecto a la fuente. Para esta sección sísmica se utilizó una velocidad de reducción de 6 km/s y un filtro Butterworth Pasabanda de grado 4, con un rango de frecuencia entre 2 y 7 Hz. (Tabla 5)

Según los antecedentes, existen más registros de esta sección sísmica hacia el norte del disparo, sin embargo, no fueron de relevancia porque no se observaron reverberaciones. Esto puede ser debido a que, en esta área, donde el *offset* mínimo es menor a cero, corresponde al piedemonte de la cadena montañosa de los Andes de Mérida.

Se pudieron observar 4 reverberaciones asociadas a la fase Pg. Estas se generan cuando la onda directa se refracta primero en el basamento de la cuenca sedimentaria y luego refleja entre la primera capa y el basamento (Figura 34). Estas se pueden deber a contrastes altos de impedancia y a profundidades menores del basamento.

El basamento en esta zona estuvo a 3,2 km de profundidad aproximadamente. Donde buzamiento del basamento fue hacia el suroeste.

Tabla 5. Características del procesamiento del disparo de Barinas.

Perfil Andes Central								
Barinas								
Velocidad de reducción (km/s)	Filtro Butterworth Pasabanda			Offset		Tiempo reducido		Número de múltiples
	Frecuencia menor (Hz)	Frecuencia mayor (Hz)	Grado	Mín. (km)	Máx. (km)	Mín. (s)	Máx. (s)	
6	2	7	4	0	95	-5	35	17

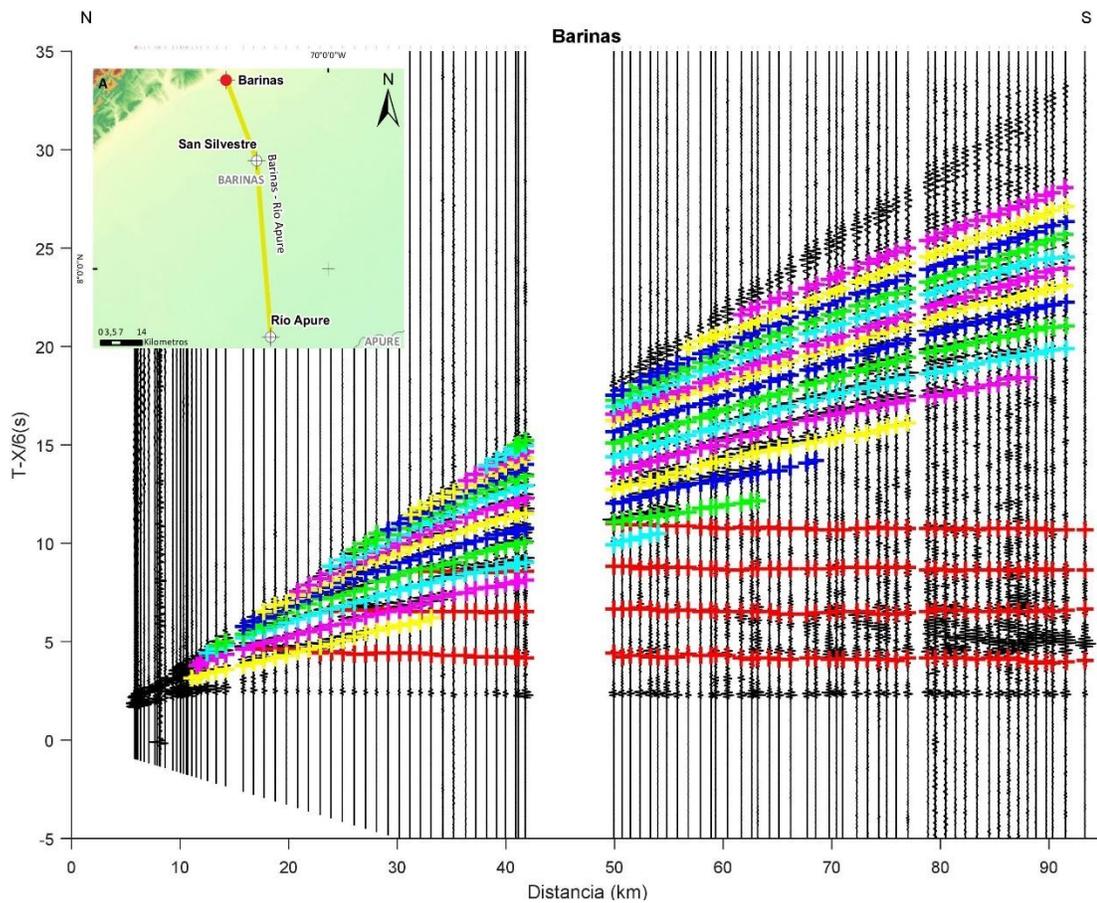


Figura 36. Sección sísmica interpretada del disparo de Barinas. Las cruces de color rojo representan las reverberaciones asociadas a la fase Pg. Las demás al paquete sedimentario.

### 5.1.1.2 Disparo de San Silvestre

En esta sección sísmica se pueden observar un total de 12 reverberaciones asociadas al paquete sedimentario entre -51 y 65 km de distancia con respecto a la fuente (Figura 37). Se pudieron detectar reverberaciones al norte y al sur de la fuente, debido a que los receptores dispuestos alrededor de esta, se encontraban sobre la cuenca Barinas – Apure y no estaban cerca del piedemonte andino como en el caso del disparo de Barinas. Se utilizó una velocidad de reducción de 6 km/s y un filtro Butterworth Pasabanda de grado 3, con un rango de frecuencia entre 3 y 8 Hz. (Tabla 6).

Tabla 6. Características del procesamiento del disparo de San Silvestre.

Perfil Andes Central								
San Silvestre								
Velocidad de reducción (km/s)	Filtro Butterworth Pasabanda			Offset		Tiempo reducido		Número de múltiples
	Frecuencia menor (Hz)	Frecuencia mayor (Hz)	Grado	Mín. (km)	Máx. (km)	Mín. (s)	Máx. (s)	
6	3	8	3	-60	70	0	25	12

Se observó que hacia el sur de la fuente hubo un mayor número reverberaciones (3) que hacia el norte del mismo. Además de esto, las reverberaciones hacia el sur del disparo presentaron una mayor propagación en longitud *offset* y tiempo reducido.

Al igual que el disparo de Barinas, también se pueden apreciar reverberaciones de la fase Pg. Sin embargo, solo se observaron 2 que se propagaron hacia el sur de la fuente. Esto pudo haber ocurrido por el buzamiento del basamento hacia el norte.

El basamento en esta zona estuvo a 3,6 km de profundidad aproximadamente, indicando un aumento de profundidad en esta zona. Donde el buzamiento del basamento es hacia el noroeste.

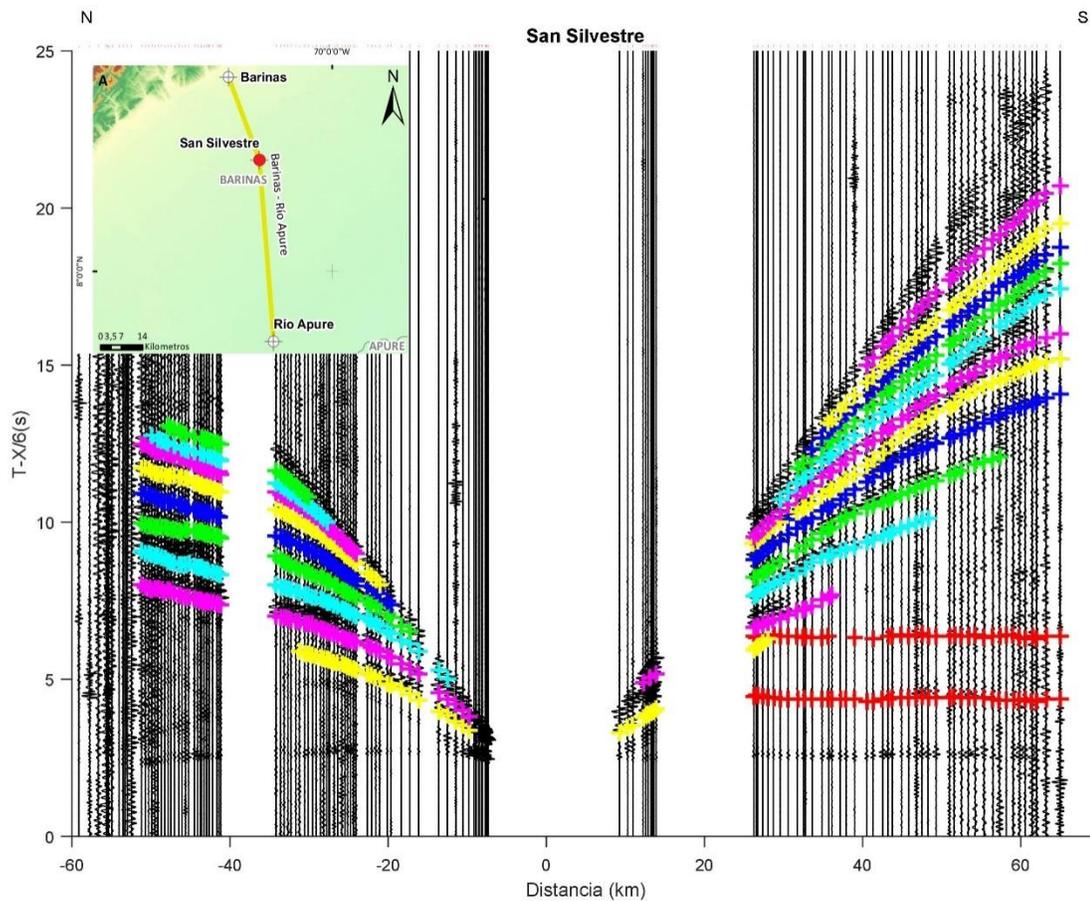


Figura 37. Sección sísmica interpretada del disparo de San Silvestre. Las cruces de color rojo representan las reverberaciones asociadas a la fase Pg. Las demás al paquete sedimentario.

### 5.1.1.3 Disparo de Río Apure

Para esta sección sísmica se seleccionaron un total de 19 reverberaciones asociadas al paquete sedimentario entre -100 y -7 km de distancia *offset* (Figura 38). Se utilizó una velocidad de reducción de 6 km/s con un filtro Butterworth Pasabanda de grado 4, con un rango de frecuencia entre 2 y 6 Hz. (Tabla 7). Sólo se observaron reverberaciones al norte de la fuente debido a que no había receptores dispuestos al sur del mismo. Sin embargo, se estima que, si hubiera habido receptores al sur del disparo, se habrían podido observar reverberaciones.

Esta sección sísmica fue la que presentó más reverberaciones con respecto a las demás secciones de este segmento. Esto puede ser debido a la profundidad y buzamiento del basamento y la primera capa.

En esta sección también se pudieron observar reverberaciones de la fase Pg. Al igual que el disparo de Barinas, ésta también presentó un total de 4 reverberaciones de la fase Pg, con una longitud de desplazamiento *offset* similar (hasta 90 - 100 km).

El basamento en esta zona estuvo a 2,8 km de profundidad aproximadamente, indicando una disminución en profundidad del mismo. Donde el buzamiento del basamento es hacia el suroeste.

Tabla 7. Características del procesamiento del disparo de Río Apure.

Perfil Andes Central								
Río Apure								
Velocidad de reducción (km/s)	Filtro Butterworth Pasabanda			Offset		Tiempo reducido		Número de múltiples
	Frecuencia menor (Hz)	Frecuencia mayor (Hz)	Grado	Mín. (km)	Máx. (km)	Mín. (s)	Máx. (s)	
6	2	6	4	-100	0	0	35	19

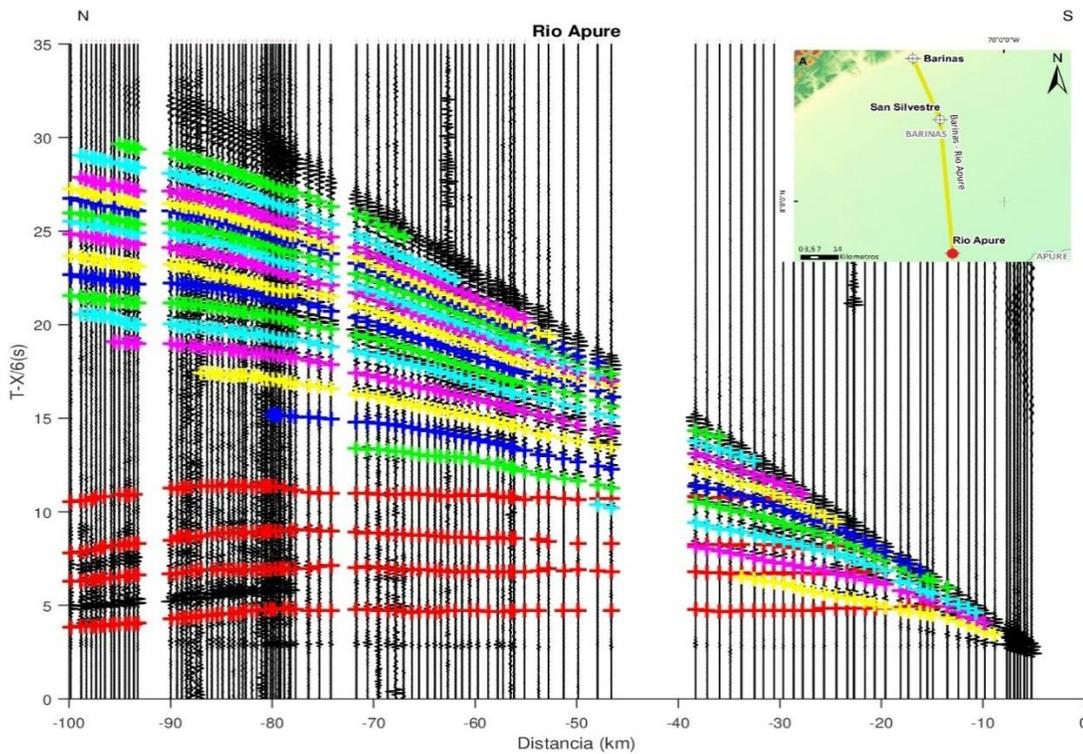


Figura 38. Sección sísmica interpretada del disparo de Río Apure. Las cruces de color rojo representan las reverberaciones asociadas a la fase Pg. Las demás al paquete sedimentario.

#### 5.1.1.4 Disparo de Santa Bárbara de Barinas

En esta sección sísmica se lograron observar un total de 20 reverberaciones asociadas al paquete sedimentario entre 10 y 104 km de distancia *offset* (Figura 39). Se utilizó una velocidad de reducción de 6 km/s con un filtro Butterworth Pasabanda de grado 3, con un rango de frecuencia entre 3 y 7 Hz (Tabla 8).

Para este disparo no se pudo observar ninguna reverberación de la fase Pg, a diferencia de las demás secciones sísmicas de esta cuenca. Esto puede estar motivado a que las profundidades del basamento en esta zona sean mayores que en los demás disparos de la cuenca.

La primera reverberación se detectó a una distancia *offset* entre 10 y 31 km, con un tiempo reducido entre 3 y 6 segundos respectivamente. Mientras que la última reverberación se detectó a una distancia *offset* entre 67 y 107 km, con un tiempo reducido entre 23 y 35 segundos respectivamente.

El basamento en esta zona estuvo a 3,8 km de profundidad aproximadamente. Donde el buzamiento del basamento es hacia el noroeste.

Tabla 8. Características del procesamiento del disparo de Santa Bárbara de Barinas.

Perfil Andes Sur								
Santa Bárbara de Barinas								
Velocidad de reducción (km/s)	Filtro Butterworth Pasabanda			Offset		Tiempo reducido		Número de múltiples
	Frecuencia menor (Hz)	Frecuencia mayor (Hz)	Grado	Mín. (km)	Máx. (km)	Mín. (s)	Máx. (s)	
6	3	7	3	0	110	0	35	20

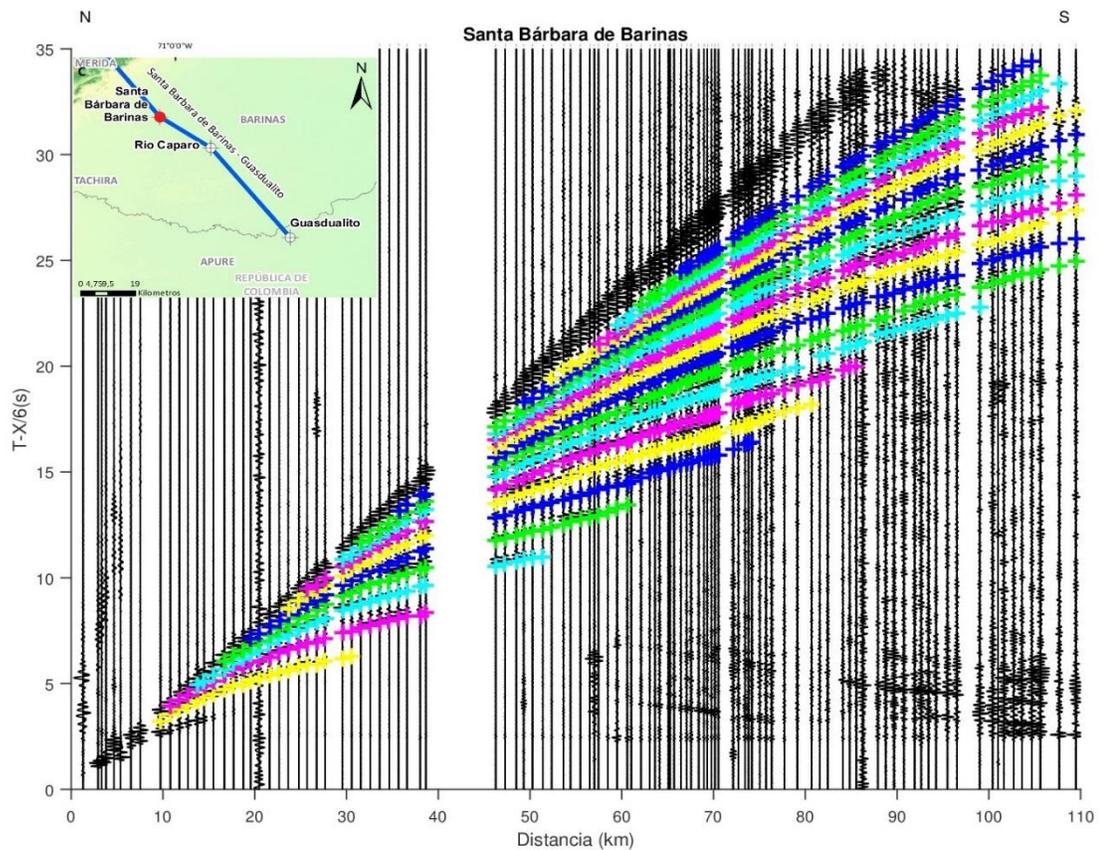


Figura 39. Sección sísmica interpretada del disparo de Santa Bárbara de Barinas. Las cruces representan las reverberaciones asociadas al paquete sedimentario.

### 5.1.1.5 Disparo de Río Caparo

Para esta sección sísmica se lograron observar un total de 15 reverberaciones asociadas al paquete sedimentario en una distancia *offset* entre -40 y 120 km (Figura 40). Para el procesamiento de la sección se utilizó una velocidad de reducción de 6 km/s de grado 4, con un rango de frecuencias entre 2 y 5 Hz. (Tabla 9).

Tabla 9. Características del procesamiento del disparo de Río Caparo.

Perfil Andes Sur								
Río Caparo								
Velocidad de reducción (km/s)	Filtro Butterworth Pasabanda			Offset		Tiempo reducido		Número de múltiples
	Frecuencia menor (Hz)	Frecuencia mayor (Hz)	Grado	Mín. (km)	Máx. (km)	Mín. (s)	Máx. (s)	
6	2	5	4	-40	120	0	35	15

Se observaron reverberaciones a ambos lados de la fuente, debido a que los receptores estaban dispuestos alrededor de la misma. De Las 15 reverberaciones asociadas al paquete sedimentario, solo 6 se desplegaron tanto al norte como al sur del disparo, mientras que las demás (9) solo se desplegaron hacia el sur. Esto puede ser debido a la profundidad y buzamiento del basamento. En el que la zona que presentó un mayor número de reverberaciones, el basamento sea más somero y haya un menor espesor sedimentario.

También se pudo observar una reverberación asociada a la fase Pg. Sin embargo, esta solo se observó hacia el sur de la fuente. Esto puede estar motivado con las diferencias en profundidades de la cuenca a ambos lados del disparo.

El basamento en esta zona estuvo a 2,6 km de profundidad aproximadamente, indicando una disminución de profundidad en esta zona. Donde el buzamiento del basamento es hacia el noroeste.

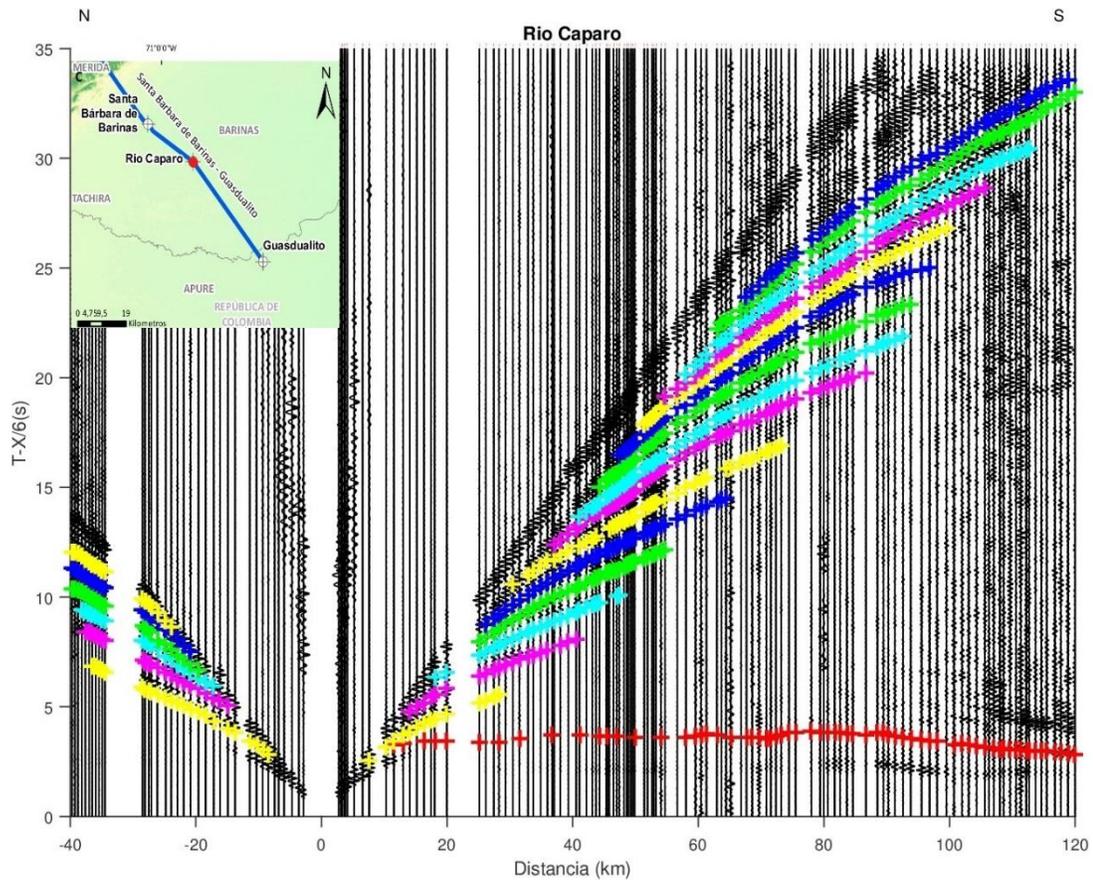


Figura 40. Sección sísmica interpretada del disparo de Río Caparo. Las cruces de color rojo representan las reverberaciones asociadas a la fase Pg. Las demás al paquete sedimentario.

#### 5.1.1.6 Disparo de Guasualito

En esta sección sísmica se seleccionaron un total de 20 reverberaciones asociadas al paquete sedimentario entre -82 y 110 km de distancia *offset*, siendo la sección con la mayor cantidad de reverberaciones observadas junto a la sección de Santa Bárbara de Barinas (Figura 41). Para el procesamiento de la sección se utilizó una velocidad de reducción de 6 km/s con un filtro Butterworth Pasabanda de grado 4, con un rango de frecuencia entre 4 y 7 Hz. (Tabla 10).

El basamento en esta zona estuvo a 2 km de profundidad aproximadamente, indicando una disminución de profundidad en esta zona. Donde el buzamiento del basamento es hacia el suroeste.

Tabla 10. Características del procesamiento del disparo de Guasdualito.

Perfil Andes Sur								
Guasdualito								
Velocidad de reducción (km/s)	Filtro Butterworth Pasabanda			Offset		Tiempo reducido		Número de múltiples
	Frecuencia menor (Hz)	Frecuencia mayor (Hz)	Grado	Mín. (km)	Máx. (km)	Mín. (s)	Máx. (s)	
6	4	7	4	-85	110	0	40	20

Debido a que los receptores se encontraban dispuestos alrededor del disparo, se observaron reverberaciones al norte y al sur del disparo. En el que se observó un mayor número de reverberaciones hacia el sur que hacia el norte del disparo. De las 20 reverberaciones asociadas al paquete sedimentario seleccionadas, 13 fueron observadas tanto al norte como al sur del disparo, mientras que las demás (7) solo se observaron hacia el sur. Esto puede estar motivado a un aumento en el espesor del paquete sedimentario que se registra al sur de la falla de Apure.

Se pudieron observar un total de 2 reverberaciones asociadas a la fase Pg. Sin embargo, solo la primera se observó a ambos lados del disparo. La segunda reverberación solo se observó que se propagaba hacia el sur. Esto puede estar relacionado con la diferencia de profundidades del basamento y su buzamiento.

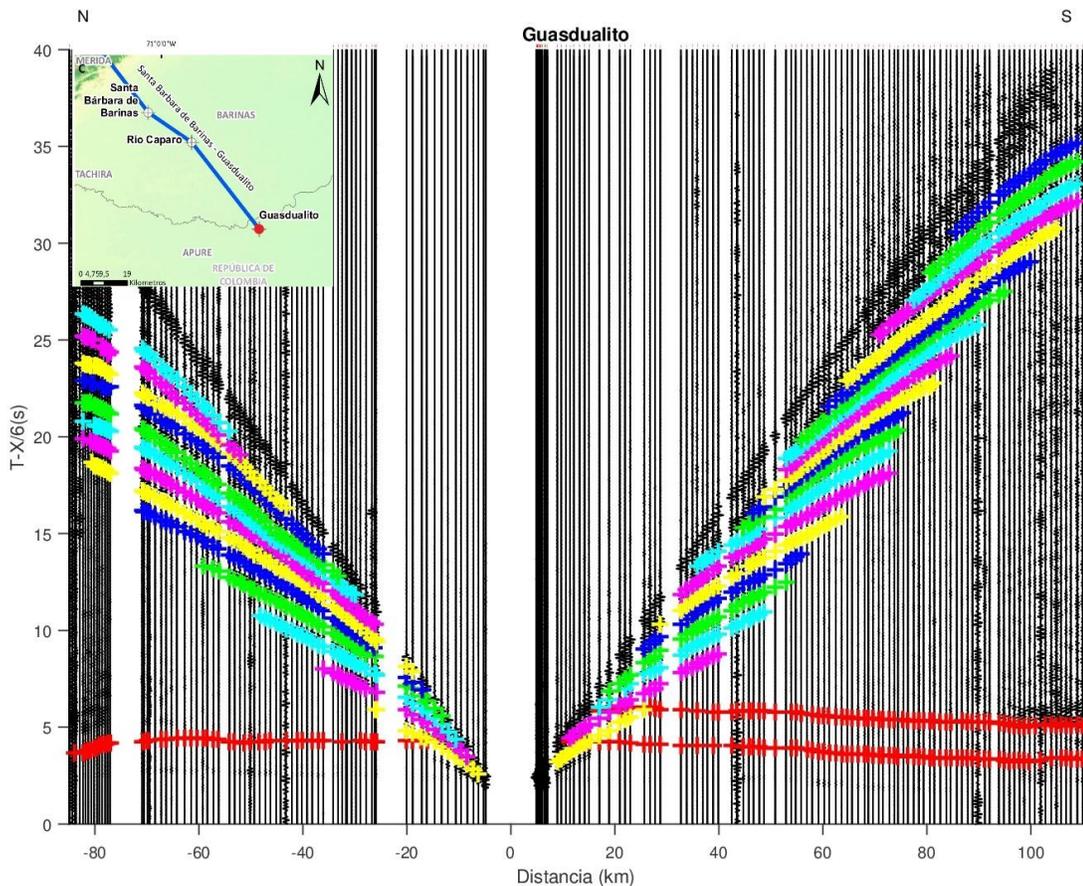


Figura 41. Sección sísmica interpretada del disparo de Guasualito. Las cruces de color rojo representan las reverberaciones asociadas a la fase Pg. Las demás al paquete sedimentario.

## 5.1.2 Cuenca de Maracaibo

### 5.1.2.1 Disparo de Santa Bárbara del Zulia

En esta sección sísmica se seleccionaron un total de 18 reverberaciones asociadas al paquete sedimentario entre -114 y 78 km de distancia *offset* (Figura 42). Para el procesamiento de esta sección sísmica se utilizó una velocidad de reducción de 6 km/s, con la aplicación de un filtro Butterworth Pasabanda de grado 2, en un rango de frecuencias entre 2 y 4 Hz (Tabla 11).

Se observaron reverberaciones hacia el norte y sur del disparo, debido a que los receptores estaban dispuestos alrededor de la fuente. Se pudo observar que hubo un mayor número de reverberaciones hacia el norte que hacia el sur. De las

18 reverberaciones seleccionadas, 13 de estas se propagaron hacia el norte y el sur del disparo, mientras que las otras 5 solo se desplegaron hacia el norte. Sin embargo, aunque en la sección sísmica solo se observan las primeras 4 reverberaciones hacia el sur, se estima que estas también se desplegaron hacia el norte, pero no pudieron ser seleccionadas por falta de receptores entre los -60 y 0 km de distancia *offset*. La diferencia cuantitativa de reverberaciones entre el norte y el sur del disparo, puede estar asociado a un basamento más somero hacia el norte. Donde la última reverberación seleccionada hacia el norte del disparo se ubicaba hasta 33 segundos de tiempo reducido, mientras que la última reverberación seleccionada al sur del disparo se ubicaba a 25 segundos de tiempo reducido.

En esta sección sísmica no se pudieron observar reverberaciones asociadas a la fase Pg.

El basamento en esta zona se estimó a 6,5 km de profundidad aproximadamente. Donde el buzamiento del basamento es hacia el suroeste.

Tabla 11. Características del procesamiento del disparo de Santa Bárbara del Zulia.

<b>Perfil Andes Sur</b>								
<b>Santa Bárbara del Zulia</b>								
Velocidad de reducción (km/s)	Filtro Butterworth Pasabanda			Offset		Tiempo reducido		Número de múltiples
	Frecuencia menor (Hz)	Frecuencia mayor (Hz)	Grado	Mín. (km)	Máx. (km)	Mín. (s)	Máx. (s)	
6	2	4	2	-120	80	0	35	18

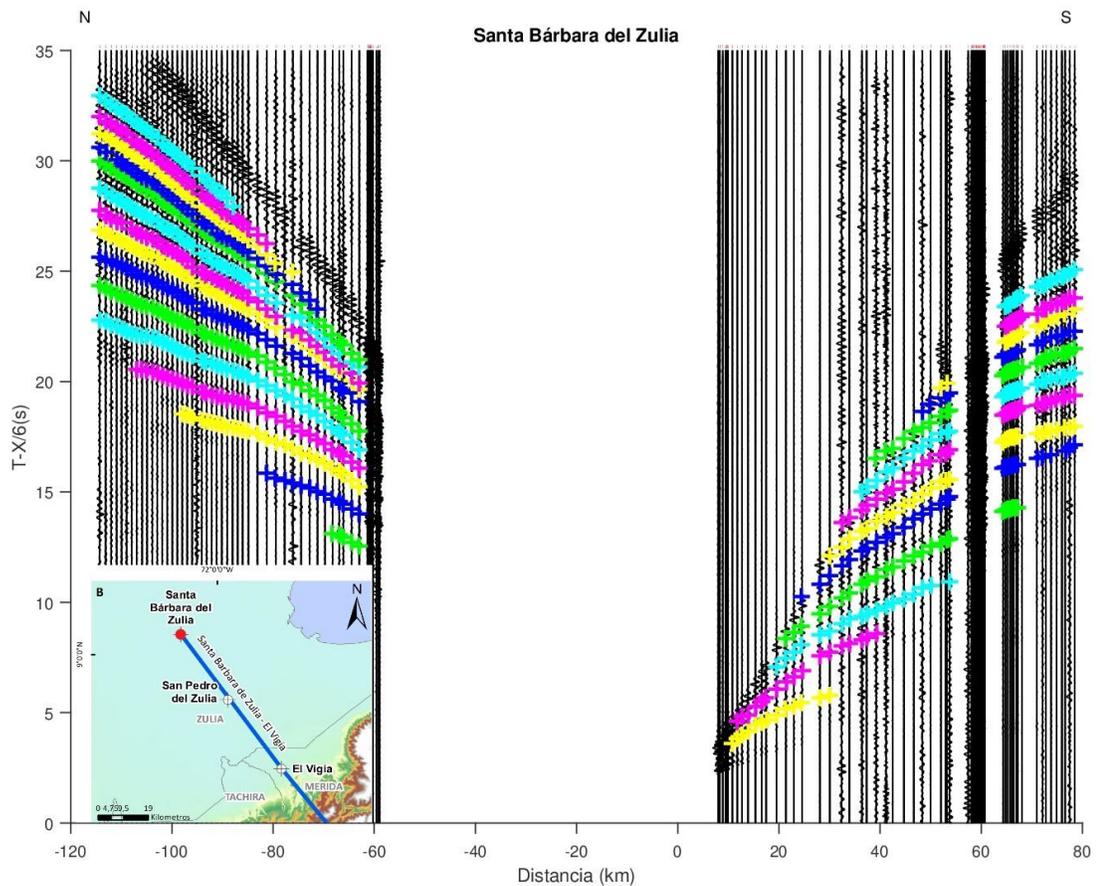


Figura 42. Sección sísmica interpretada del disparo de Santa Bárbara del Zulia. Las cruces representan las reverberaciones asociadas al paquete sedimentario.

### 5.1.2.2 Disparo de San Pedro

En esta sección sísmica se observaron un total de 14 reverberaciones asociadas al paquete sedimentario entre -145 y 59 km de distancia *offset* (Figura 43). Además de esto, también se pudo observar levemente una reverberación asociada a Pg que se propagó al sur del disparo. Sin embargo, esta fue complicada señalarla debido a que sus amplitudes eran muy bajas.

Para el procesamiento de esta sección se utilizó una velocidad de educción de 6 km/s y un filtro Butterworth Pasabanda de grado 2, con un rango de frecuencias entre 3 y 5 Hz. (Tabla 12).

Tabla 12. Características del procesamiento del disparo de San Pedro.

<b>Perfil Andes Sur</b>								
<b>San Pedro</b>								
Velocidad de reducción (km/s)	Filtro Butterworth Pasabanda			Offset		Tiempo reducido		Número de múltiples
	Frecuencia menor (Hz)	Frecuencia mayor (Hz)	Grado	Mín. (km)	Máy. (km)	Mín. (s)	Máy. (s)	
6	3	5	2	-150	60	0	40	14

Se pudieron observar reverberaciones tanto al norte como al sur del disparo, en el que hubo un mayor número de reverberaciones al norte que al sur, motivado al buzamiento del basamento. De las 14 reverberaciones seleccionadas, solo 5 de estas se observaron tanto al norte como al sur del disparo, mientras que las otras 9 solo se observaron hacia el norte del mismo. La última reverberación observada al sur del disparo se ubicó a 15 segundos de tiempo reducido, mientras que la última reverberación observada al norte del disparo se ubicó a 38 segundos de tiempo reducido (más del doble).

El basamento en esta zona se estimó a 7,7 km de profundidad aproximadamente, indicando un aumento de profundidad en esta zona. Donde el buzamiento del basamento continúa hacia el suroeste.

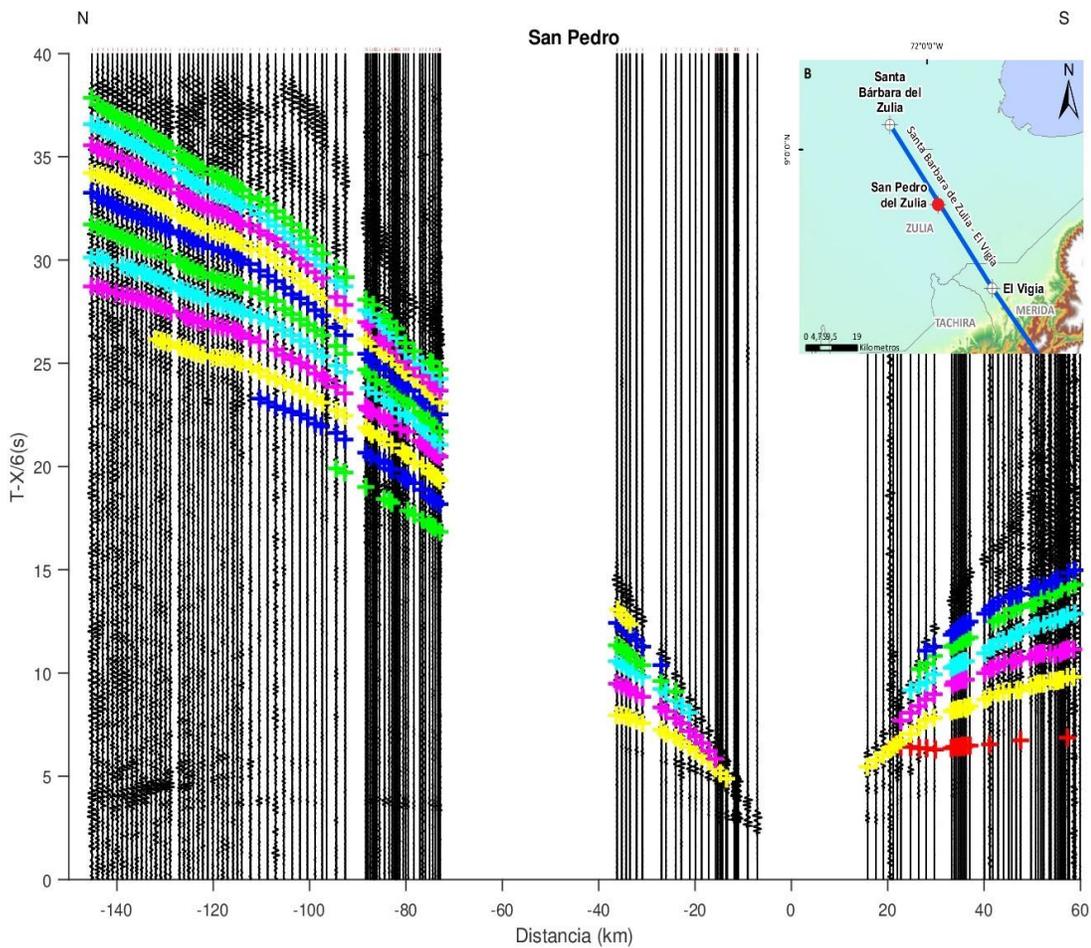


Figura 43. Sección sísmica interpretada del disparo de San Pedro. Las cruces de colores representan las reverberaciones asociadas al paquete sedimentario.

### 5.1.2.3 Disparo de El Vigía

En esta sección sísmica se pudieron observar un total de 13 reverberaciones asociadas al paquete sedimentario dispuestas entre -68 y -11 km de distancia *offset* (Figura 44). También se pudo observar una reverberación asociada a Pg muy levemente.

Solo se pudieron observar reverberaciones hacia el norte del disparo, debido a que los receptores dispuestos al sur del mismo, se encontraban sobre el piedemonte de cadena montañosa de los Andes de Mérida. Para el procesamiento de esta sección, se utilizó una velocidad de reducción de 6 km/s, con un filtro Butterworth Pasabanda de grado 2, con un rango de frecuencias entre 1 y 3 Hz. (Tabla 13).

Tabla 13. Características del procesamiento del disparo de El Vigía.

Perfil Andes Sur								
El Vigía								
Velocidad de reducción (km/s)	Filtro Butterworth Pasabanda			Offset		Tiempo reducido		Número de múltiples
	Frecuencia menor (Hz)	Frecuencia mayor (Hz)	Grado	Mín. (km)	Máx. (km)	Mín. (s)	Máx. (s)	
6	1	3	2	-70	0	0	30	13

Esta fue la sección sísmica que presentó menos reverberaciones en comparación con las demás secciones sísmicas de este estudio. Además de esto, las reverberaciones se desplegaron a poca distancia, donde la última reverberación seleccionada se observó hasta los 24 segundos de tiempo reducido.

El basamento en esta zona se estimó a 9 km de profundidad aproximadamente, indicando un aumento de profundidad en esta zona. Donde el buzamiento del basamento es hacia el noroeste.

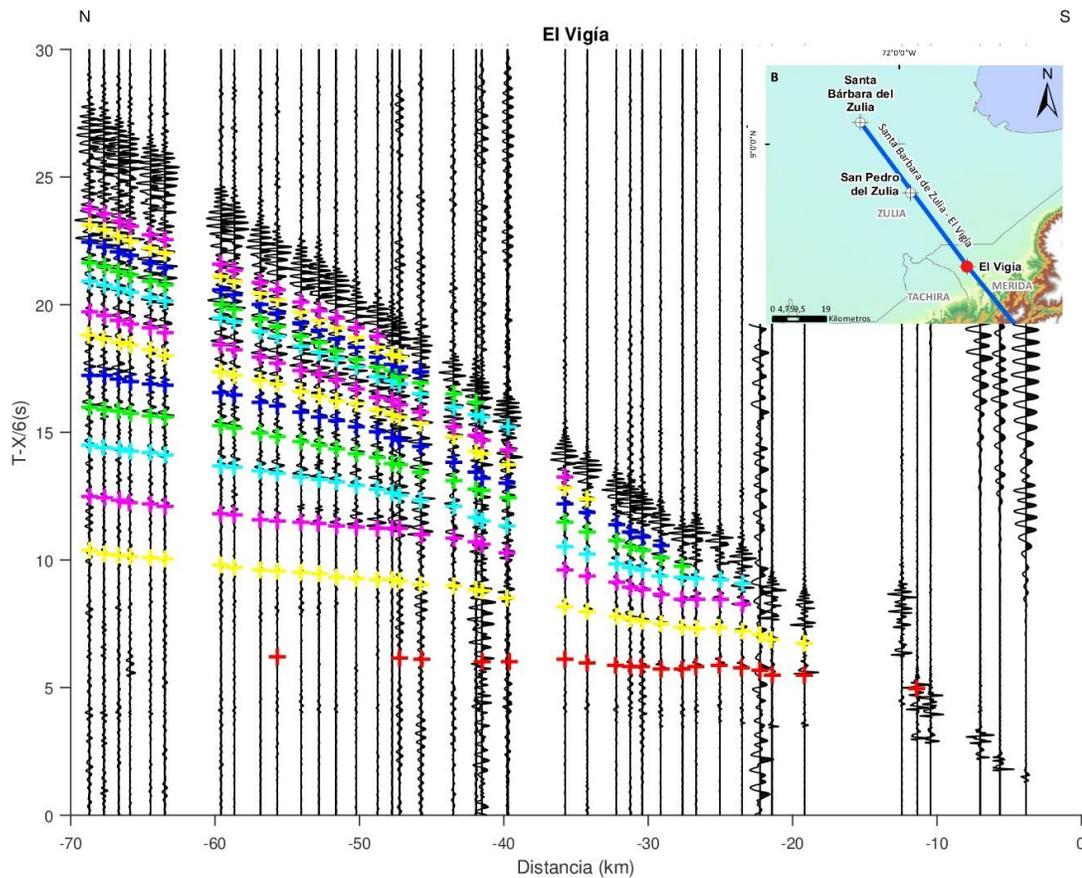


Figura 44. Sección sísmica interpretada del disparo de El Vigía. Las cruces de colores representan las reverberaciones asociadas al paquete sedimentario.

## 5.2 Caracterización de las reverberaciones

En esta sección se describirán brevemente las características relacionadas con las reverberaciones seleccionadas. Por ejemplo, en la Tabla 14 se queda señalada la cantidad de reverberaciones observadas en cada disparo de estudio, y un promedio de las reverberaciones presentes en cada cuenca. Los disparos que presentaron mayor número de reverberaciones fueron los de Santa Bárbara de Barinas y Guasualito (20), ambos del perfil Andes Sur en la cuenca Barinas – Apure, mientras que el disparo que presentó un menor número de reverberaciones fue El Vigía (12). En promedio, la cuenca Barinas – Apure fue la cuenca que presentó un mayor número de reverberaciones (17,5), en comparación con la cuenca de Maracaibo (14,67). El número de reverberaciones depende de diferentes factores, entre ellos puede estar el

contraste de impedancia, la estratificación, la profundidad y el buzamiento de las estructuras. En el caso de la cuenca Barinas-Apure, esta presentó un mayor número de reverberaciones que la cuenca de Maracaibo debido a que esta presenta un mayor contraste de impedancia, un menor espesor sedimentario y menores profundidades de basamento.

Tabla 14. Promedios de múltiples y profundidades alcanzadas por cuenca.

Cuencas	Disparo	Número de múltiples reflexiones observadas	Promedio de múltiples reflexiones por cuenca
Barinas - Apure	Barinas	17	17,5
	San Silvestre	12	
	Río Apure	19	
	Santa Bárbara de Barinas	20	
	Río Caparo	17	
	Guasqualito	20	
Maracaibo	Santa Bárbara de Zulia	18	14,67
	San Pedro	14	
	El Vigía	12	

### 5.3.1 Mapas cuantitativos de reverberaciones por cuenca

A continuación, se muestran los mapas cuantitativos de las reverberaciones observadas en las cuencas Barinas – Apure y Maracaibo. En estos se pueden observar las tendencias de las reverberaciones por cada segmento estudiado.

En la Figura 45 se observa la distribución y tendencia de las reverberaciones en la cuenca Barinas – Apure, en la que ambos segmentos presentan una menor cantidad reverberaciones en sus disparos centrales. Sin embargo, esto puede estar motivado a que se utilizó una carga de adquisición explosiva menor a la empleada en los otros

disparos de estos dos segmentos. Por lo tanto, al obviar los disparos centrales, se puede observar que la tendencia de las reverberaciones tiende levemente hacia el sur.

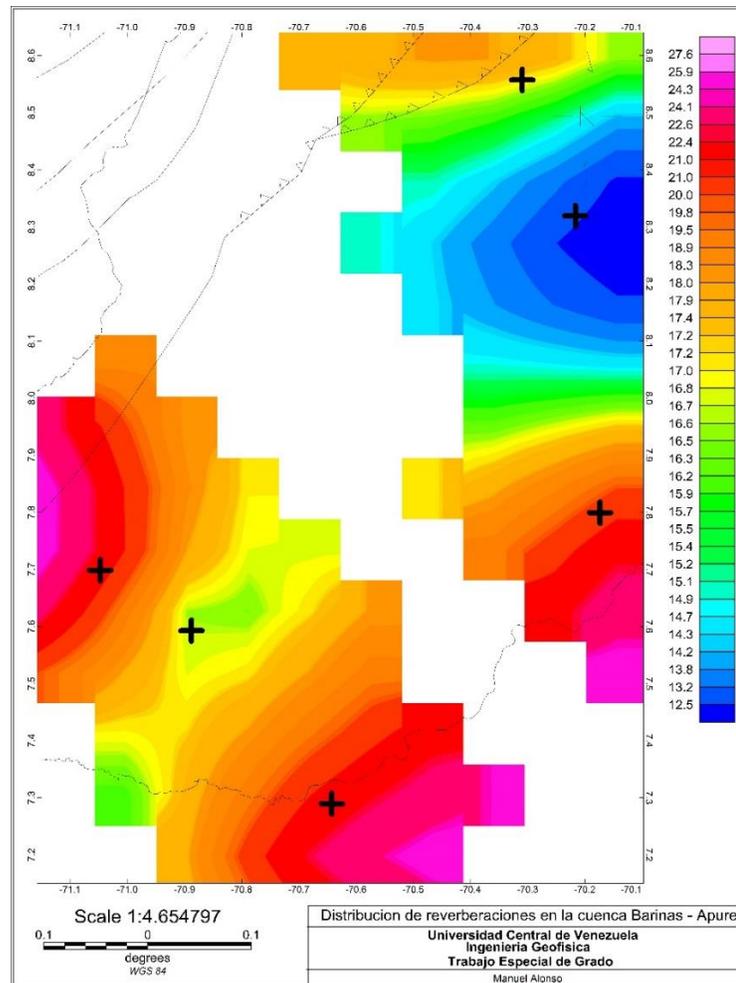


Figura 45. Mapa cuantitativo de las reverberaciones asociadas al paquete sedimentario observadas distribuidas en la cuenca Barinas – Apure, indicando mediante cruces (+) la ubicación de los disparos.

En la Figura 46 se observa el mapa cuantitativo de las reverberaciones distribuidas a lo largo de la cuenca de Maracaibo. En esta se puede apreciar como la tendencia con respecto al número de reverberaciones está marcada hacia el norte. De esta manera se puede corroborar que el contraste de impedancia es menor hacia el sur, donde existen mayores profundidades de basamento y espesor sedimentario.

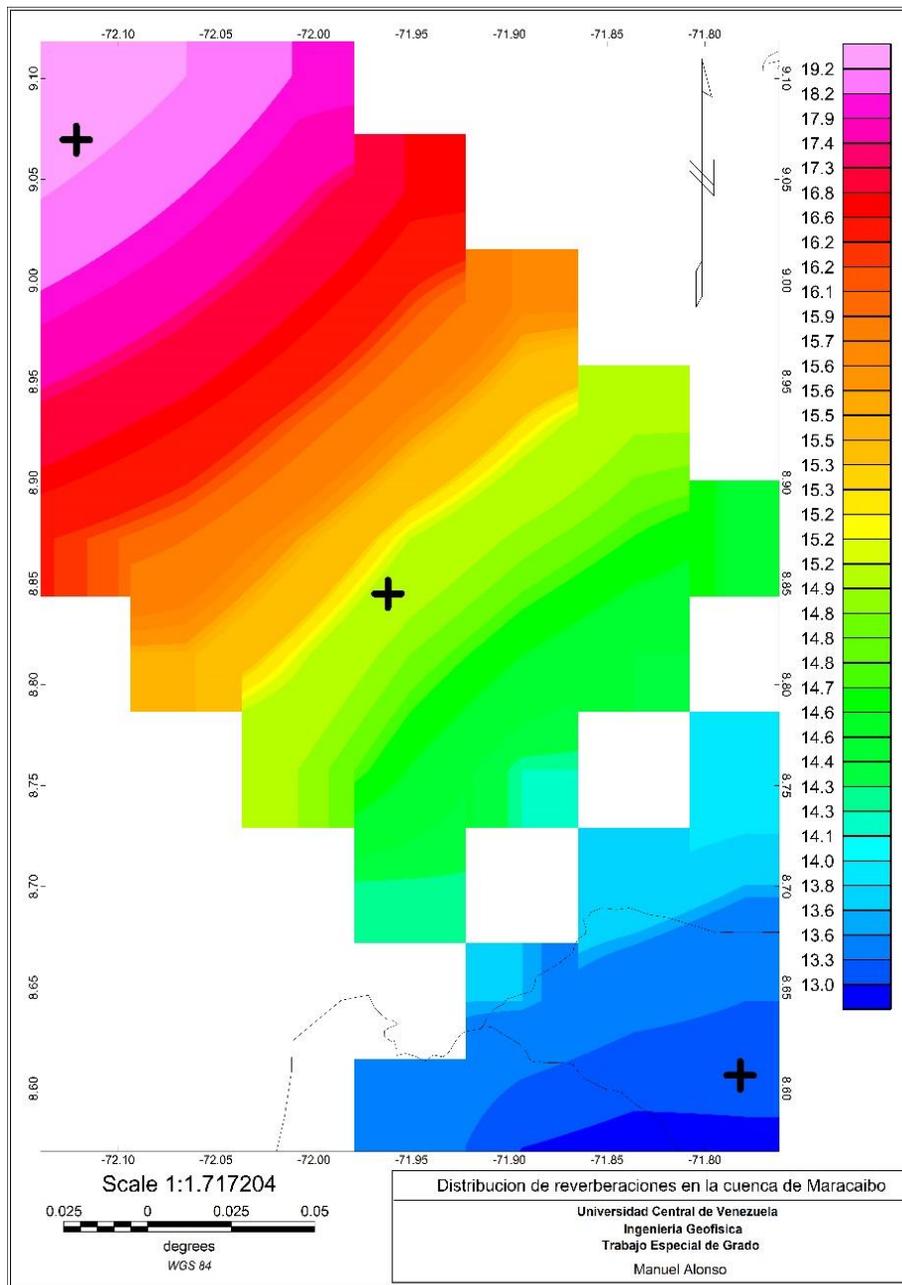


Figura 46. Mapa cuantitativo de reverberaciones asociadas al paquete sedimentario distribuidas en la cuenca Maracaibo, indicando mediante cruces (+) la ubicación de los disparos.

### 5.3.2 Tablas de velocidades aparentes de reverberaciones por segmento

A continuación, se muestran las tablas de velocidades aparentes de las distintas reverberaciones seleccionadas por cada segmento de estudio.

En la Tabla 15 se pueden observar las velocidades aparentes de las 12 a 19 reverberaciones asociadas a paquetes sedimentarios, observadas en el segmento Barinas – Río Apure. En esta se puede apreciar una disminución progresiva de las velocidades a medida que se fueron generando; desde 3,6 km/s hasta 2,5 km/s aproximadamente. El disparo de San Silvestre, específicamente al norte del mismo, fue el que presentó las velocidades aparentes de reverberaciones más altas. Mientras que el disparo que presentó menores velocidades aparentes fue el de Barinas. Estas velocidades podrían deberse a la profundidad y el buzamiento del basamento y la primera capa de baja velocidad. Se puede observar que, a medida que las reverberaciones se generan, estas presentan una menor velocidad que la previa. Esta disminución sucesiva de las velocidades podría ser generada por la interacción con las ondas superficiales. Y debido a esto, se registraron menores velocidades de reverberaciones en las zonas donde el basamento era menos profundo.

Tabla 15. Promedio de velocidades de reverberaciones en el segmento Barinas -Río Apure.

<b>CUENCA BARINAS - APURE</b>				
<b>SEGMENTO BARINAS - RÍO APURE</b>				
<b>Múltiples</b>	<b>Velocidades aparentes (km/s)</b>			
	<b>Barinas</b>	<b>San Silvestre norte</b>	<b>San Silvestre sur</b>	<b>Río Apure</b>
M1	3,298	3,664	2,800	3,387
M2	3,264	3,802	3,798	3,259
M3	3,154	3,832	3,541	3,127
M4	3,382	3,926	3,439	3,558
M5	3,159	3,751	3,304	3,609
M6	3,121	3,411	3,123	3,604
M7	3,087	3,342	2,968	3,842
M8	3,163	3,403	2,751	3,837
M9	3,001	3,530	2,830	3,820

<b>CUENCA BARINAS - APURE</b>				
<b>SEGMENTO BARINAS - RÍO APURE</b>				
<b>Múltiples</b>	<b>Velocidades aparentes (km/s)</b>			
	<b>Barinas</b>	<b>San Silvestre norte</b>	<b>San Silvestre sur</b>	<b>Río Apure</b>
M10	2,921	-	2,678	3,602
M11	2,913	-	2,635	3,607
M12	2,780	-	2,500	3,303
M13	2,810	-	-	3,201
M14	2,662	-	-	3,209
M15	2,679	-	-	3,037
M16	2,687	-	-	3,087
M17	2,651	-	-	3,083
M18	-	-	-	3,056
M19	-	-	-	2,862
Promedio	2,984	3,629	3,031	3,373

En la Tabla 16 se pueden apreciar las velocidades aparentes promedio de las 15 a 20 reverberaciones asociadas al paquete sedimentario observadas en el segmento Santa Bárbara de Barinas – Guasualito. Las velocidades aparentes de las reverberaciones van disminuyendo a medida que se generan; desde 3,3 km/s hasta 2,2 km/s aproximadamente. En este caso el disparo de Río Caparo, específicamente el sector sur, fue el que registró velocidades aparentes más altas. Mientras que el disparo de Santa Bárbara de Barinas fue el que presentó velocidades aparentes más bajas. Al igual que en el segmento anterior, los disparos que presentaron un mayor número de reverberaciones fueron los que registraron velocidades aparentes de reverberaciones más bajas.

Tabla 16. Promedio de velocidades de reverberaciones en el segmento Santa Bárbara de Barinas - Guasdualito.

<b>CUENCA BARINAS - APURE</b>					
<b>SEGMENTO SANTA BARBARA DE BARINAS - GUASDUALITO</b>					
<b>Múltiples</b>	<b>Velocidades promedio aparentes (km/s)</b>				
	<b>Santa Bárbara de Barinas</b>	<b>Río Caparo norte</b>	<b>Río Caparo sur</b>	<b>Guasdualito norte</b>	<b>Guasdualito sur</b>
M1	3,362	3,218	3,160	3,034	2,904
M2	3,225	3,298	3,455	3,054	3,128
M3	3,114	3,103	3,413	3,130	3,174
M4	3,099	3,074	3,334	3,165	3,084
M5	3,153	3,020	3,212	3,003	2,999
M6	3,135	2,751	3,133	3,013	3,054
M7	3,019	-	3,030	2,997	3,136
M8	2,984	-	3,035	3,004	3,129
M9	2,832	-	3,001	2,830	3,030
M10	2,991	-	2,939	2,851	3,029
M11	2,798	-	2,821	2,950	2,989
M12	2,834	-	2,855	2,538	2,900
M13	2,782	-	2,930	2,678	2,826
M14	2,693	-	2,894	-	2,798
M15	2,630	-	2,813	-	2,828
M16	2,552	-	-	-	2,810
M17	2,506	-	-	-	2,914
M18	2,504	-	-	-	2,830
M19	2,385	-	-	-	2,794
M20	2,284	-	-	-	2,748
Promedio	2,844	3,078	3,068	2,942	2,955

En la Tabla 17 se pueden observar las velocidades aparentes promedio de las 12 a 18 reverberaciones observadas en el segmento Santa Bárbara del Zulia – El Vigía. En esta se puede apreciar una disminución progresiva de las velocidades a medida que se fueron generando. Esto puede ser debido a mayores tiempos de viaje a través del medio, por cada reverberación generada.

En este caso las velocidades aparentes de las reverberaciones son mayores en el disparo de Santa Bárbara del Zulia, específicamente en su sector sur. Mientras que las velocidades aparentes menores se registraron en el disparo de El Vigía.

Al igual que en la cuenca Barinas – Apure, estos valores de velocidad pueden estar relacionados con la profundidad y el buzamiento del basamento de la cuenca.

Tabla 17. Promedio de velocidades de reverberaciones en el segmento Santa Bárbara del Zulia - El Vigía.

<b>CUENCA BARINAS - APURE</b>					
<b>SEGMENTO SANTA BARBARA DEL ZULIA - EL VIGIA</b>					
<b>Múltiples</b>	<b>Velocidades promedio aparentes (km/s)</b>				
	<b>Santa Bárbara del Zulia norte</b>	<b>Santa Bárbara del Zulia sur</b>	<b>San Pedro norte</b>	<b>San Pedro sur</b>	<b>El Vigía</b>
M1	-	3,519	3,562	3,954	4,333
M2	-	3,300	2,955	4,232	4,040
M3	-	3,580	3,019	3,655	3,601
M4	3,570	3,681	3,134	3,522	3,211
M5	3,881	3,592	3,177	3,402	3,083
M6	3,942	3,668	3,523	-	2,846
M7	3,835	3,715	3,636	-	2,807
M8	3,670	3,681	3,463	-	2,797
M9	3,483	3,685	3,432	-	2,744
M10	3,574	3,566	3,259	-	2,705
M11	3,356	3,521	3,257	-	2,467
M12	3,274	3,719	3,116	-	2,436
M13	3,170	3,491	3,148	-	-
M14	3,032	-	3,059	-	-
M15	3,056	-	-	-	-
M16	3,032	-	-	-	-
M17	2,990	-	-	-	-
M18	2,943	-	-	-	-
Promedio	3,387	3,594	3,267	3,753	3,089

### 5.3 Secciones sintéticas y modelos 1D

#### 5.3.1 Cuencas Barinas – Apure

En la Tabla 18 se pueden observar los valores promedios de entrada utilizados en las secciones sintéticas y los modelos 1D de los disparos correspondientes a la cuenca Barinas – Apure. Se generó un modelo de tres capas en el que se calcularon las impedancias acústica de cada capa y el contraste de impedancia entre cada interfase.

Tabla 18. Valores promedio utilizados para la elaboración de los modelos 1D y las secciones sísmicas sintéticas correspondientes a la cuenca Barinas – Apure.

Cuenca Barinas-Apure								
Columna geológica	Formación	VP (km/s)	VS (km/s)	Densidad (g/cc)	Espesor (km)	Impedancia (km.g/s.cc)	Contraste de impedancia (km.g/s.cc)	
CENOZOICO	Qr	Holoceno	-	2,3	1,33	2,25	2	5,175
		Pleistoceno						
	Neógeno	Plioceno	Rio Yuca	4	2,32	2,42	2	9,68
		Mioceno	Parángula					
		Guafita						
		Oligoceno	Paguey					
		Eoceno	Gobernador					
MESOZOICO	Cretácico	Superior	5,2	3,02	2,54	1	13,208	
		Navay						Burguita
		Escandalosa						
Inferior	Aguardiente							

Utilizando los parámetros generales de la Tabla 18 se generó un modelo 1D de las velocidades de onda P y S y densidad con respecto a la profundidad de cada capa propuesto para el modelo de la cuenca Barinas – Apure (Figura 47). Como modelo de entrada para la generación de las secciones sísmicas sintéticas. Se pudo observar que las velocidades de onda P y S y densidades aumentaban con respecto a la profundidad, por la presencia de sedimentos mejor consolidados en profundidad. Este aumento se vio más abrupto en las velocidades de onda P y S a partir de la segunda capa donde los sedimentos datan del Plioceno – Mioceno. Además de esto, se graficó en los modelos 1D la velocidad del basamento cristalino con 6 km/s. A modo de ubicar el basamento dentro de los modelos.

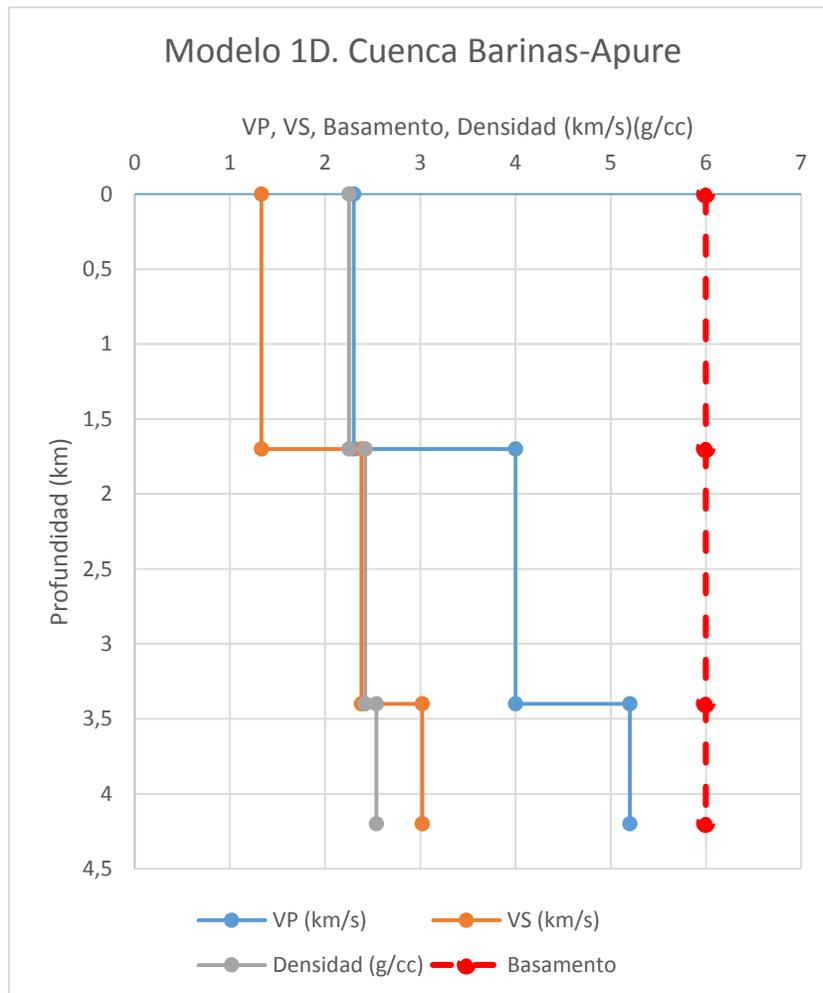


Figura 47. Modelo 1D general de la cuenca Barinas – Apure con respecto a la profundidad de cada capa.

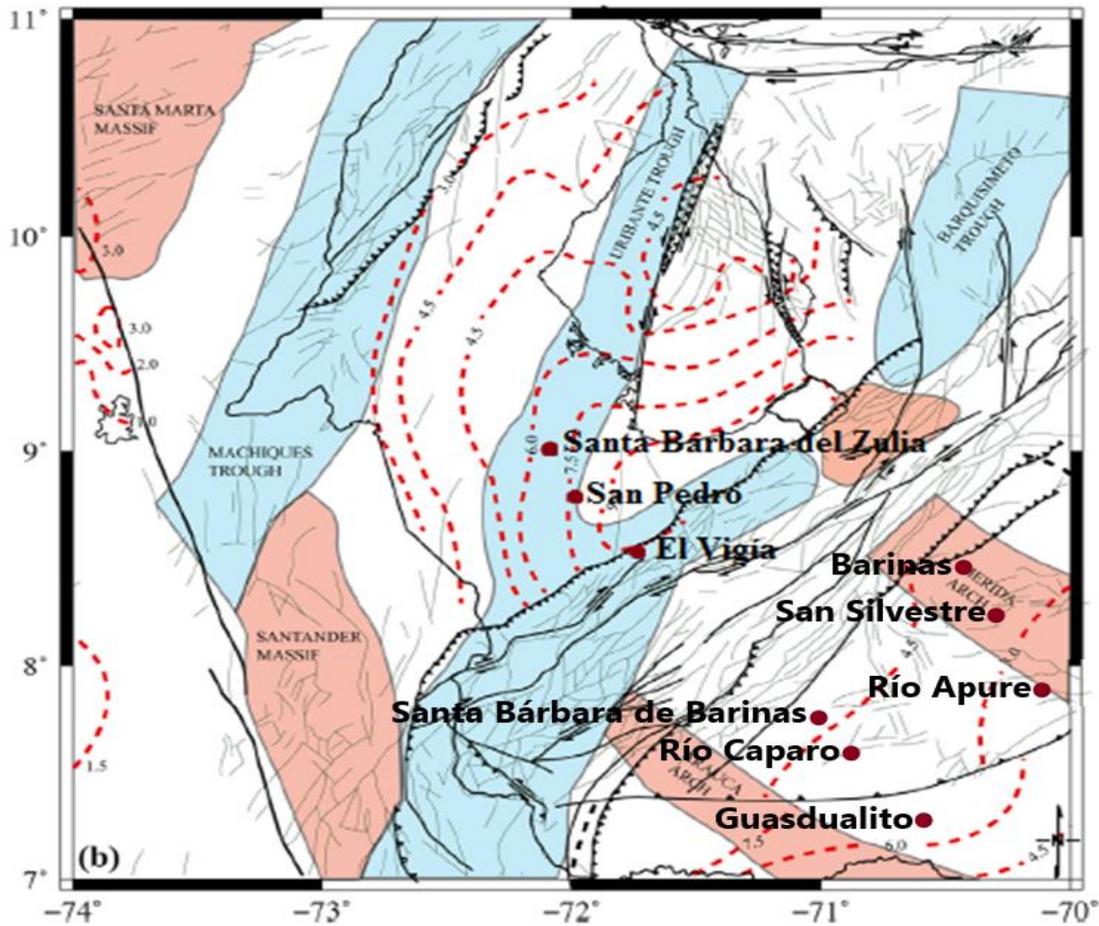


Figura 48. Mapa estructural del bloque de Maracaibo en el que se señala la ubicación de los disparos de adquisición estudiados para este trabajo (modificado de Arnaiz-Rodríguez y Audemard, 2014).

Mediante un mapa estructural del bloque de Maracaibo propuesto por Arnaiz-Rodríguez y Audemard (2014), se ubicaron los disparos de adquisición que se realizaron en las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo, para poder estimar los espesores máximos de sedimentos debajo de cada disparo (Figura 48). Estos valores se tomaron como referencia para poder estimar los espesores de cada una de las capas implementadas para los modelos 1D y secciones sísmicas sintéticas. Las líneas grises delgadas representan fallas menores, las líneas rojas punteadas representan la profundidad del basamento en kilómetros, los puntos vinotinto representan los disparos de adquisición, las formas azules representan bajos estructurales del basamento, mientras que las formas rojas representan altos estructurales generales.

### 5.3.1.1 Disparo de Barinas

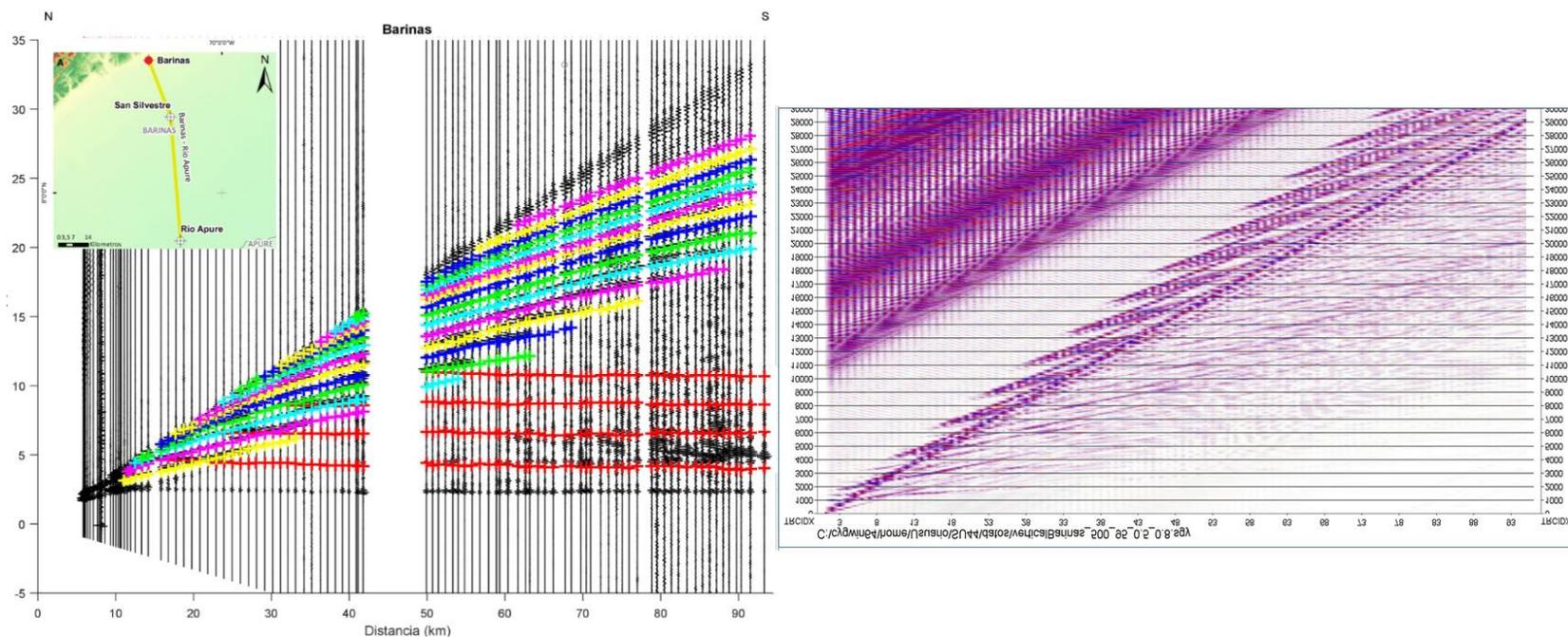


Figura 49. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de Barinas.

Se compararon las secciones sísmicas del disparo de Barinas (Figura 49). En la sección sísmica sintética se pudieron identificar principalmente las primeras reverberaciones que se observaron en la sección sísmica interpretada. A diferencia de la sección sísmica interpretada, en la sección sísmica sintética se pudo observar el efecto de las reverberaciones sobre la onda superficial, hasta darle el aspecto de una sierra, sin embargo, en la sección sísmica sintética no se logró apreciar muy bien la reverberación de la Pg.

Una vez establecidos los parámetros de adquisición, se alteraron principalmente los espesores y velocidades de onda P y S (Tabla 19) hasta que el ángulo de la onda superficial y el de las reverberaciones de ambas secciones sísmicas fueran similares, para poder construir posteriormente el modelo 1D del disparo (Figura 50).

Tabla 19. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de Barinas.

Barinas				
Esesor (km)	Profundidad (km)	VP (km/s)	VS (km/s)	Densidad (g/cc)
1,7	1,7	2,3	1,33	2,25
1,7	3,4	4	2,38	2,42
0,8	4,2	5,2	3,02	2,54

Para este modelo de 3 capas se estimó un espesor de sedimentos de 4,2 km, siendo 1,7 km el espesor de las primeras 2 capas (cada una) y 0,8 km la última. La capa de sedimentos molásicos del Plioceno (primera capa) mantiene un espesor similar a la capa de sedimentos medianamente consolidados del Mioceno (segunda capa), mientras que la capa de sedimentos consolidados del Cretácico (tercera capa) tiene un menor espesor, pero con mayor densidad. Este disparo se ubica en una región con un alto estructural en la que el basamento no se encuentra tan profundo y el buzamiento del mismo es hacia el suroeste. Además de esto presenta grandes espesores de sedimentos entre el basamento y la superficie en comparación a los siguientes disparos de este segmento.

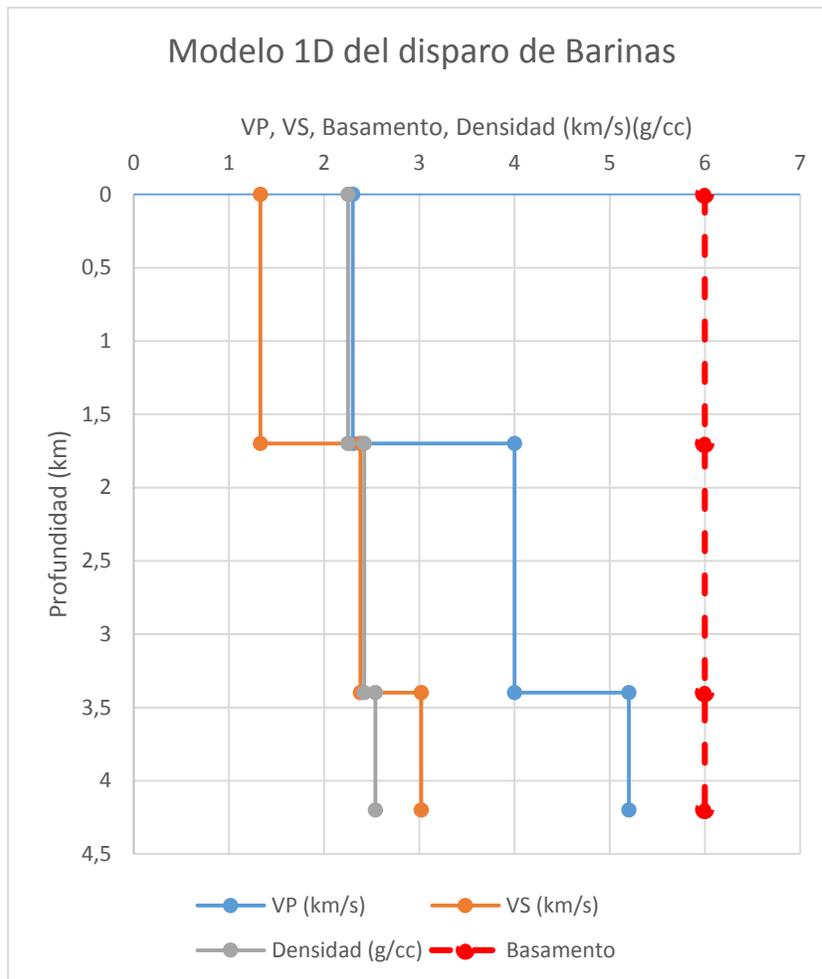


Figura 50. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de Barinas.

### 5.3.1.2 Disparo de San Silvestre

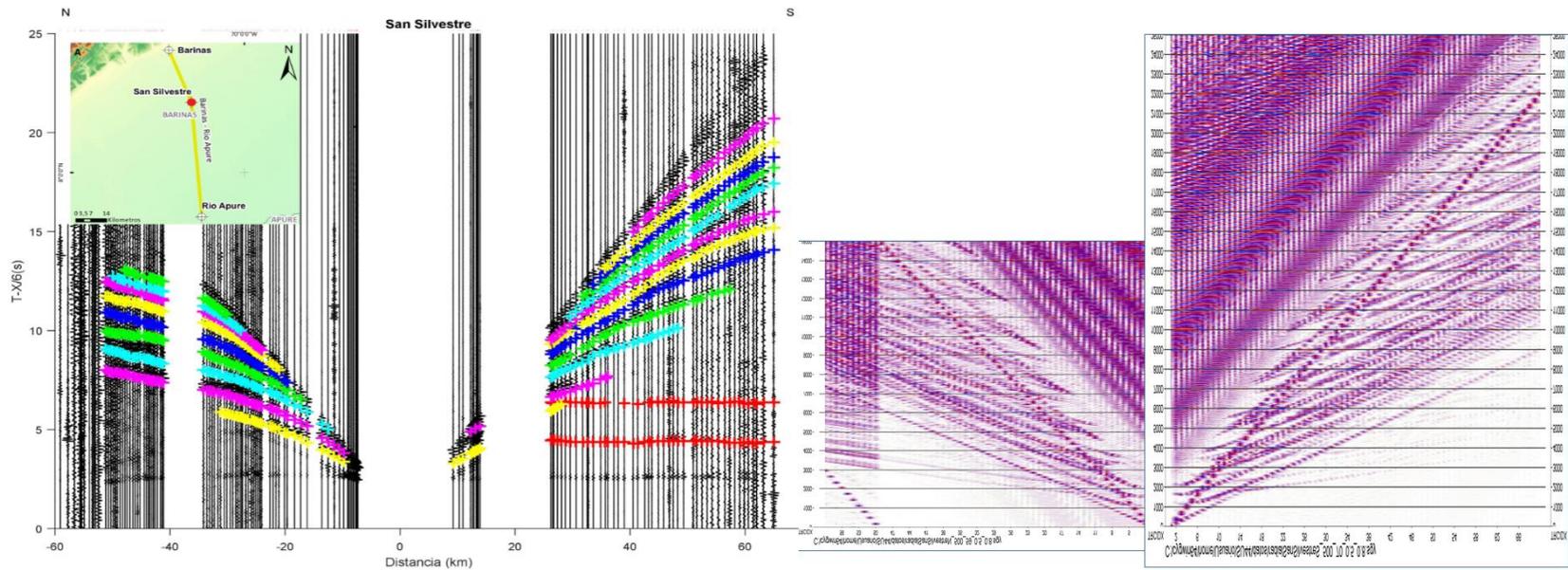


Figura 51. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de San Silvestre.

Se compararon las secciones sísmicas del disparo de San Silvestre (Figura 51). Debido a que en esta sección sísmica se observaron reverberaciones a ambos lados del disparo, se tuvieron que generar dos secciones sísmicas sintéticas, ajustando sus distancias offset y trazas en el tiempo. En la sección sísmica sintética se pudieron identificar las reverberaciones que se observaron en la sección sísmica interpretada. A diferencia de la sección sísmica interpretada, en la sección sísmica sintética se pudo observar el efecto de las reverberaciones sobre la onda superficial, sin embargo, en la sección sísmica sintética no se pudo observar la reverberación de la Pg.

Una vez establecidos los parámetros de adquisición, se alteraron principalmente los espesores y velocidades de onda P y S (Tabla 20) hasta que el ángulo de la onda superficial y el de las reverberaciones de las secciones sísmicas fueran similares, para poder construir posteriormente el modelo 1D del disparo (Figura 52).

Tabla 20. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de San Silvestre.

San Silvestre				
Espesor (km)	Prof. (km)	VP (km/s)	VS (km/s)	Densidad (g/cc)
1,3	1,3	2,3	1,33	2,25
1,4	2,7	4	2,32	2,42
0,8	3,5	5,2	3,02	2,54

Para este modelo de 3 capas se estimó un espesor de sedimentos máximos de 3,5 km, siendo 1,3 km el espesor de la primera capa, 1,4 km la segunda y 0,8 km la tercera. La capa de sedimentos molásicos del Plioceno (primera capa) tiene un espesor levemente menor a la capa de sedimentos medianamente consolidados del Mioceno (segunda capa), mientras que la capa de sedimentos consolidados del Cretácico (tercera capa) mantiene un espesor inferior al de las otras capas, pero con una mayor densidad. Se pudo observar que el basamento en esta zona se encuentra en una zona profunda y que el mismo buza levemente hacia el sur. A pesar de que hay un mayor espesor de sedimentos, las velocidades de onda P y S aún se mantienen iguales a las del disparo de Barinas.

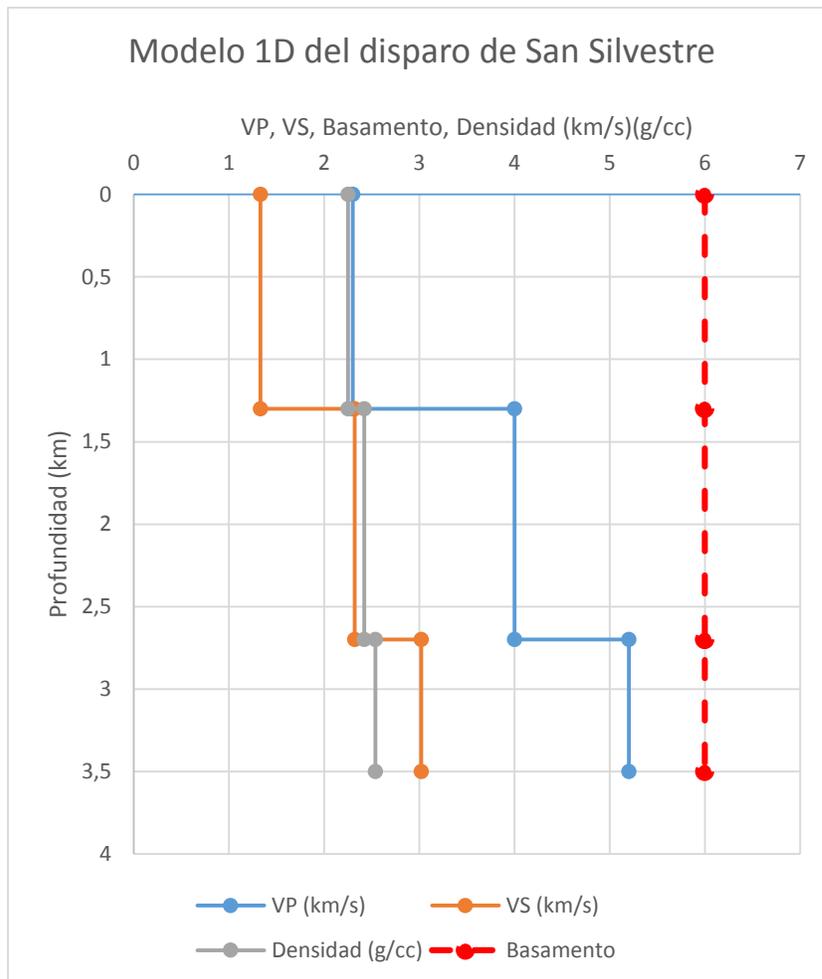


Figura 52. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de San Silvestre.

### 5.3.1.3 Disparo de Río Apure

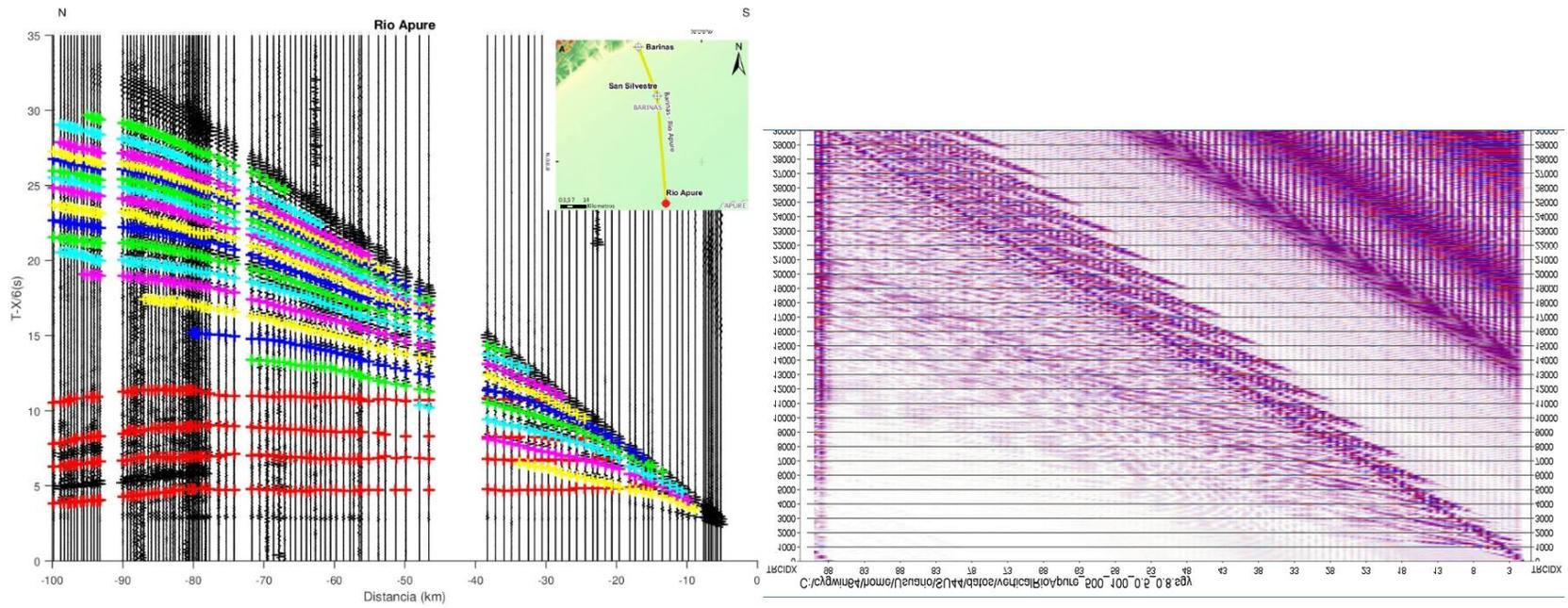


Figura 53. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de Río Apure.

Se compararon las secciones sísmicas del disparo de Río Apure (Figura 53). En la sección sísmica sintética se pudieron identificar las primeras llegadas de cada reverberación observada en la sección sísmica interpretada. Se pudo observar el efecto de las reverberaciones sobre la onda superficial en la sección sintética, sin embargo, en la sección sísmica sintética no se pudo observar la reverberación de la Pg de las primeras 4 reverberaciones interpretadas.

Una vez establecidos los parámetros de adquisición, se alteraron los espesores y velocidades de onda P y S (Tabla 21) hasta que el ángulo de la onda superficial y el de las reverberaciones de las secciones sísmicas fueran similares, para poder construir posteriormente el modelo 1D del disparo (Figura 54).

Tabla 21. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de Río Apure.

Río Apure				
Espesor (km)	Profundidad (km)	VP (km/s)	VS (km/s)	Densidad (g/cc)
1,2	1,2	2,4	1,39	2,25
1,1	2,3	4	2,38	2,42
0,5	2,8	5,2	3,02	2,54

Para este modelo de 3 capas se estimó un espesor de sedimentos máximos de 2,8 km, siendo 1,1 km el espesor de la primera capa, 1,1 km el espesor de la segunda capa y 0,5 km la tercera. La capa de sedimentos molásicos de baja densidad que datan del Plioceno (primera capa) tienen un espesor un poco mayor al espesor de la capa de sedimentos medianamente consolidados del Mioceno (segunda capa), mientras que la capa de sedimentos consolidados de mayor densidad que datan del Cretácico (tercera capa) mantiene un espesor inferior al de las otras capas.

Debido a que esta zona se encuentra sobre un alto estructural, el basamento está a pocos kilómetros de profundidad y que el mismo presenta un buzamiento hacia el norte. Tomando en cuenta el espesor de las capas en el disparo anterior, también se puede observar un buzamiento que estas buzaban hacia el norte también. Al comparar las velocidades de onda P y S con los disparos anteriores, se puede verificar que este

disparo presentó velocidades más altas. Esto se debe a menores espesores sedimentarios y menores profundidades del basamento en esta zona.

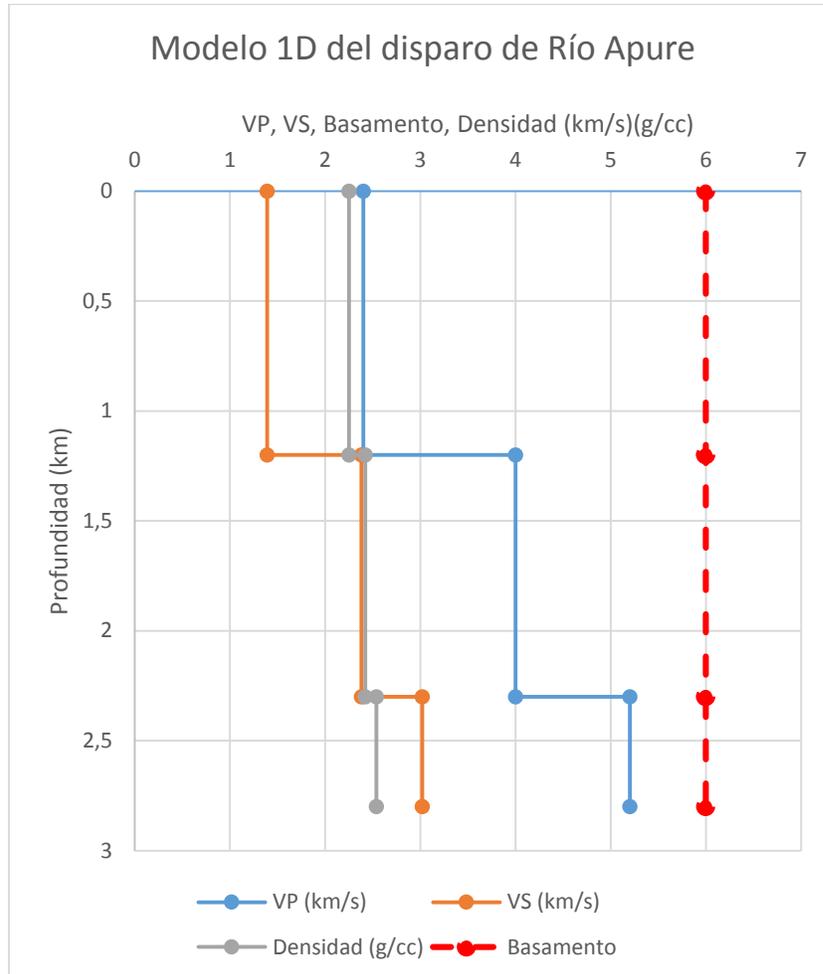


Figura 54. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de Río Apure.

### 5.3.1.4 Disparo de Santa Bárbara de Barinas

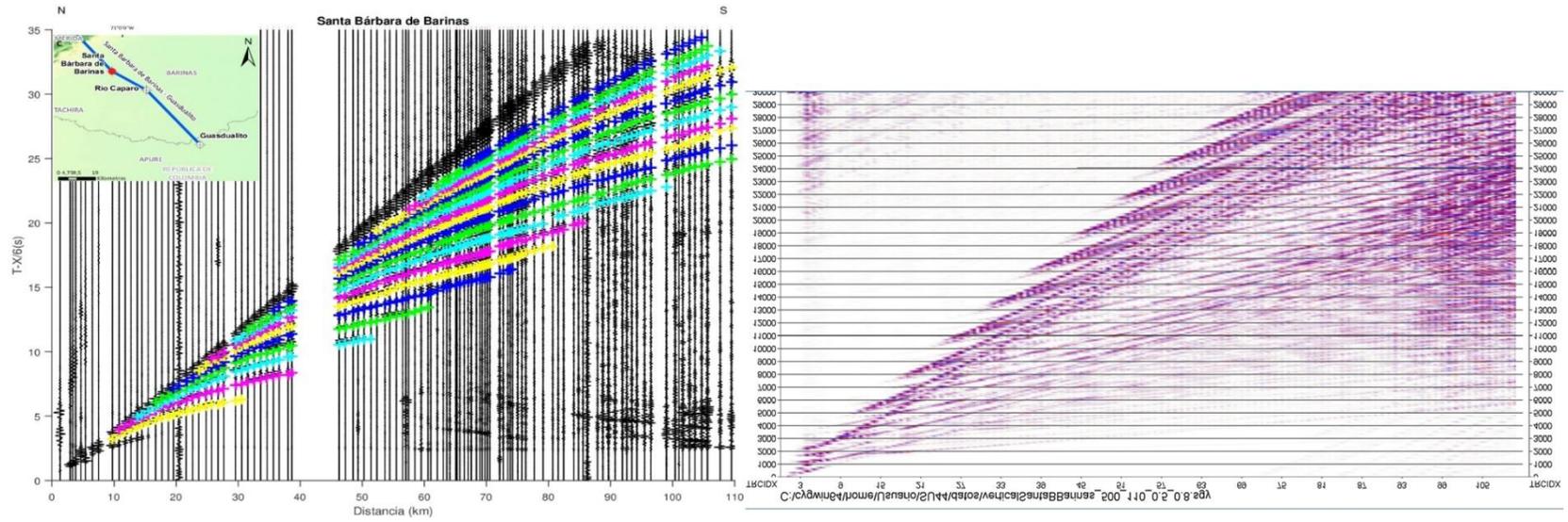


Figura 55. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de Santa Bárbara de Barinas.

Se compararon las secciones sísmicas del disparo de Santa Bárbara de Barinas (Figura 55). En la sección sísmica sintética se pudieron observar las reverberaciones que fueron señaladas en la sección sísmica interpretada. Se pudo observar el efecto de las reverberaciones sobre la onda superficial en la sección sintética.

Una vez establecidos los parámetros de adquisición, se alteraron los espesores y velocidades de onda P y S (Tabla 22) hasta que el ángulo de la onda superficial y el de las reverberaciones de las secciones sísmicas fueran similares, para poder construir posteriormente el modelo 1D del disparo de Santa Bárbara de Barinas (Figura 56).

Tabla 22. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de Santa Bárbara de Barinas.

Santa Bárbara de Barinas				
Espesor (km)	Profundidad (km)	VP (km/s)	VS (km/s)	Densidad (g/cc)
1,8	1,8	2,3	1,33	2,25
1,8	3,6	4	2,32	2,42
1	4,6	5,2	3,02	2,54

Para este modelo de 3 capas se estimó un espesor de sedimentos máximos de 4,6 km, donde el espesor de las dos primeras capas fue de 1,8 km (cada una), seguida por una última capa de 1 km de espesor. La capa de sedimentos molásicos de baja densidad que datan del Plioceno (primera capa) mantiene un espesor similar a la capa de sedimentos medianamente consolidados del Mioceno (segunda capa), mientras que la capa de sedimentos consolidados de mayor densidad que datan del Cretácico (tercera capa) mantiene un espesor inferior al de las otras capas.

Este disparo se ubica sobre una región que presenta un bajo estructural, lo que conlleva a presentar la mayor profundidad de basamento alcanzada en la cuenca Barinas – Apure para este estudio (4 km aproximadamente). Sin embargo, no presenta valores tan bajos de velocidad porque el espesor de sedimentos no es tan grande. El buzamiento del basamento en esta zona es hacia el norte.

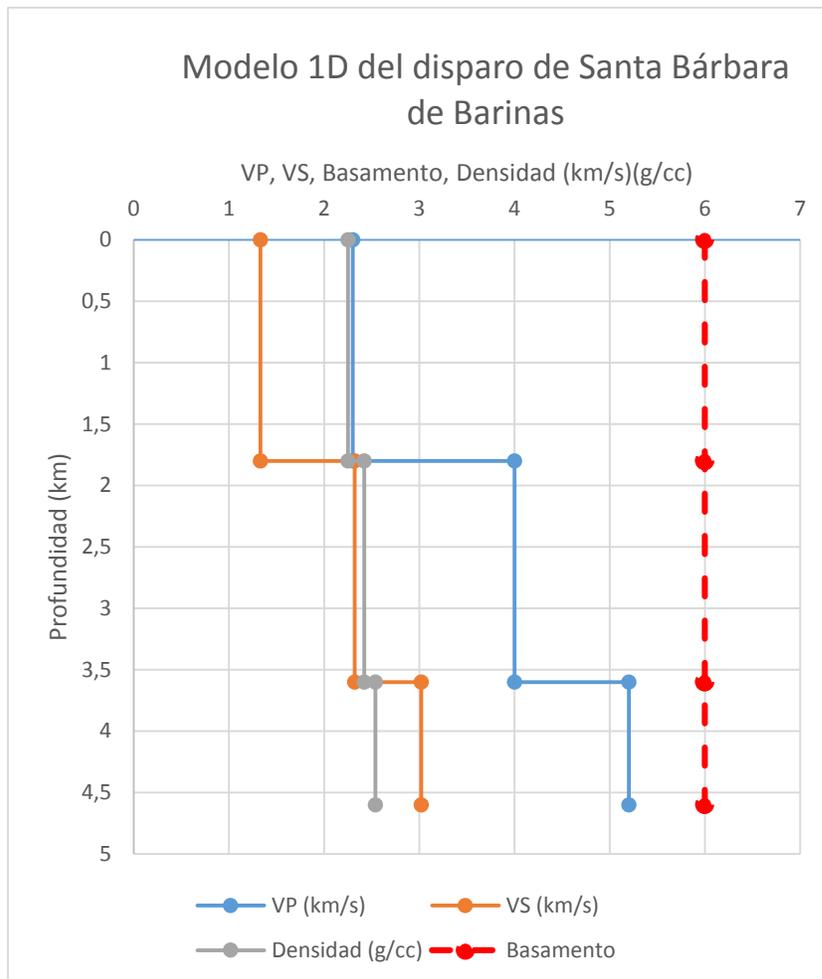


Figura 56. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de Santa Bárbara de Barinas.

### 5.3.1.5 Disparo de Río Caparo

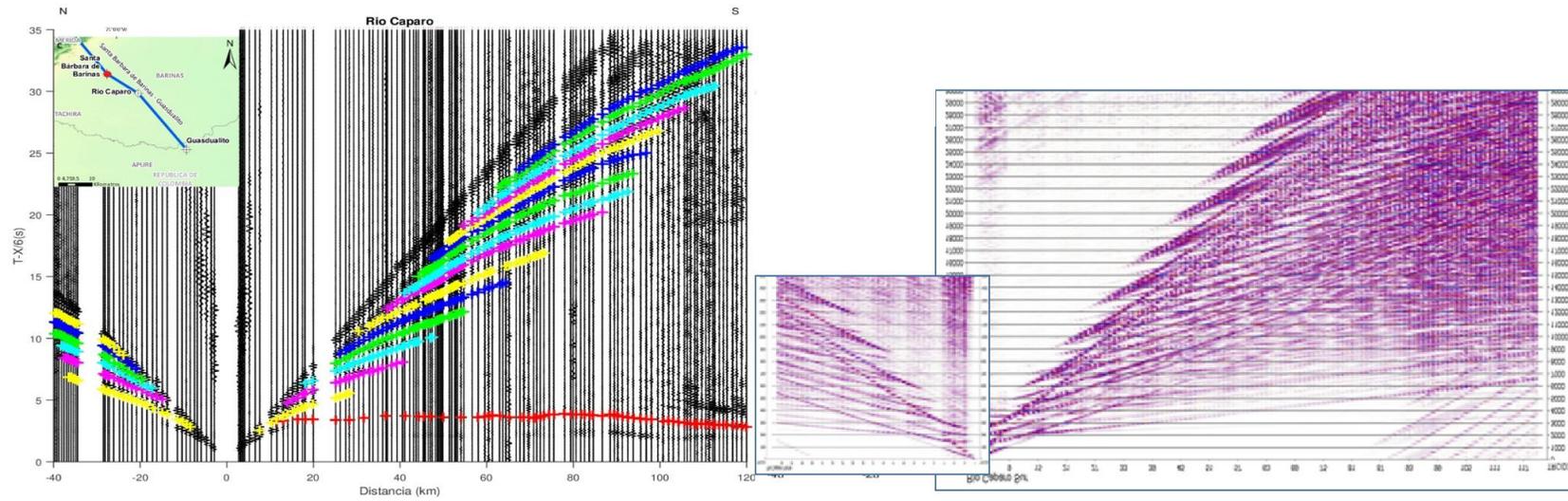


Figura 57. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de Río Caparo.

Se compararon las secciones sísmicas del disparo de Río Caparo (Figura 57). Debido a que en esta sección sísmica se observaron reverberaciones a ambos lados del disparo, se tuvieron que generar dos secciones sísmicas sintéticas, ajustando sus distancias offset y trazas en el tiempo. En la sección sísmica sintética al sur del disparo se pudieron identificar las reverberaciones que se propagaron en esta dirección, sin embargo, esto fue un poco más complicado con las reverberaciones que se propagaron hacia el norte debido a las pequeñas dimensiones de la sección sísmica sintética. A diferencia de la sección sísmica interpretada, en la sección sísmica sintética se puede observar el efecto de las reverberaciones sobre la onda superficial, sin embargo, en la sección sísmica sintética solo se puede observar el principio de la reverberación de Pg asociada a la primera reverberación.

Una vez establecidos los parámetros de adquisición, se alteraron principalmente los espesores y velocidades de onda P y S (Tabla 23) hasta que el ángulo de la onda superficial y el de las reverberaciones de las secciones sísmicas fueran similares, para poder construir posteriormente el modelo 1D del disparo de Río Caparo (Figura 58).

Tabla 23. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de Río Caparo.

Río Caparo				
Espesor (km)	Prof. (km)	VP (km/s)	VS (km/s)	Densidad (g/cc)
1,7	1,7	2,3	1,33	2,25
1,7	3,4	4	2,32	2,42
0,8	4,2	5,2	3,02	2,54

Para este modelo de 3 capas se estimó un espesor de sedimentos máximos de 4,2 km, siendo 1,7 km el espesor de las dos primeras capas (cada una), y un espesor de 0,8 km en la tercera capa. La capa de sedimentos molásicos del Plioceno (primera capa) mantiene un espesor de sedimentos similar al de los sedimentos medianamente consolidados que datan del Mioceno (segunda capa), mientras que la capa de sedimentos consolidados del Cretácico (tercera capa) mantiene un espesor inferior al de las otras capas, pero con una mayor densidad.

El basamento en esta zona sigue buzando hacia el norte, pero con un ángulo de buzamiento más pronunciado. El espesor de sedimentos en esta zona disminuye en comparación al disparo anterior, pero aún se mantienen las mismas velocidades de onda P y S.

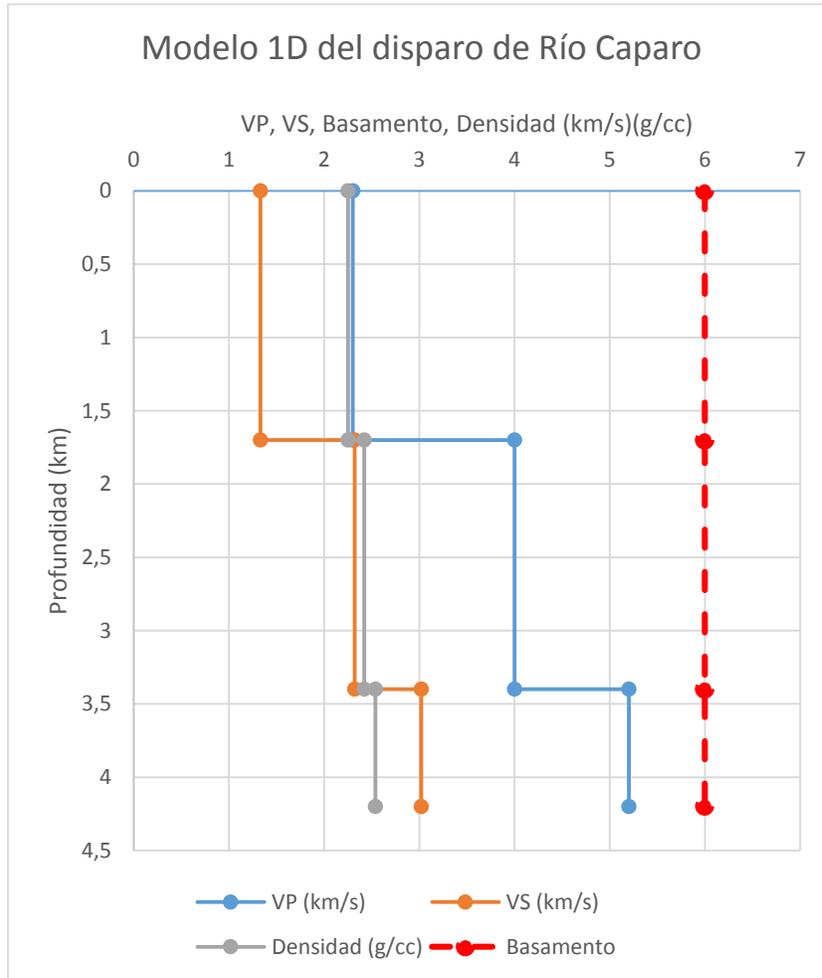


Figura 58. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de Río Caparo.

### 5.3.1.6 Disparo de Guasualito

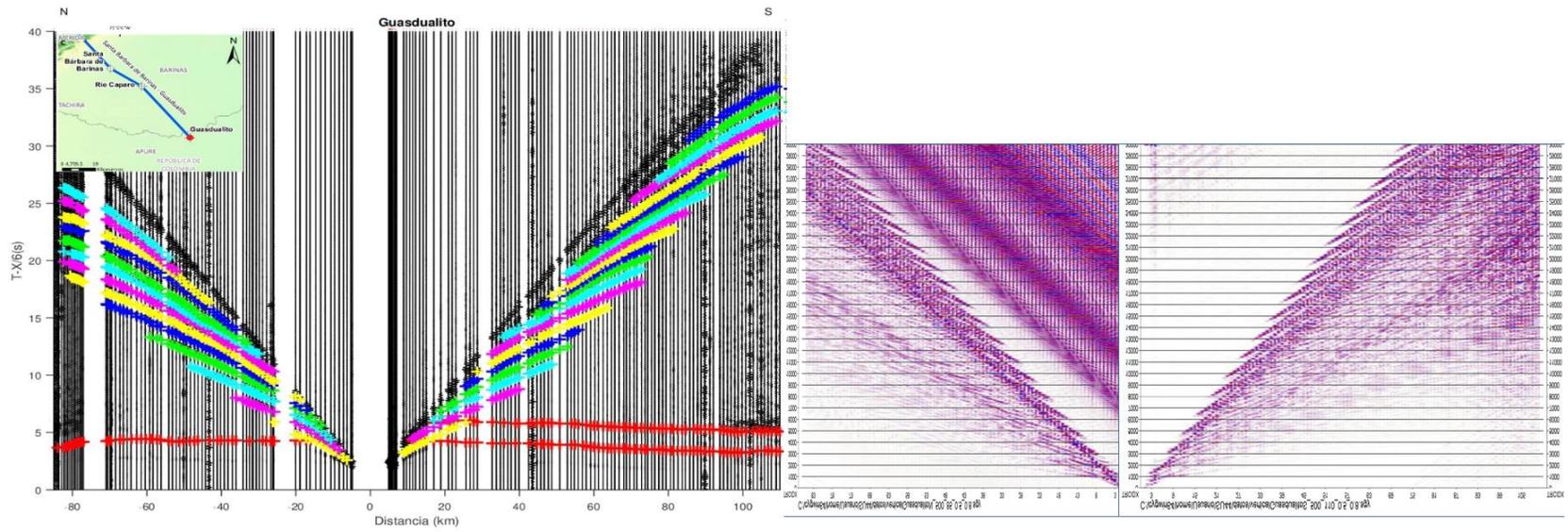


Figura 59. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de Guasualito.

Se compararon las secciones sísmicas del disparo de Guasualito (Figura 59). Debido a que en esta sección sísmica se observaron reverberaciones a ambos lados del disparo, se tuvieron que generar dos secciones sísmicas sintéticas, ajustando sus distancias offset y trazas en el tiempo. Se pudieron observar las reverberaciones de la sección sísmica interpretada en la sección sísmica sintética. Se pudo observar el efecto de las reverberaciones sobre la onda superficial, pero en la sección sísmica sintética no se pudo observar la reverberación de la Pg.

Se cambiaron los espesores y velocidades de onda P y S (Tabla 20) hasta que el ángulo de la onda superficial y el de las reverberaciones de las secciones sísmicas fueran similares, para poder construir posteriormente el modelo 1D del disparo de Guasualito (Figura 60).

Tabla 24. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de Guasualito.

Guasualito				
Espesor (km)	Profundidad (km)	VP (km/s)	VS (km/s)	Densidad (g/cc)
2,5	2,5	2,2	1,28	2,25
2,5	5	4	2,32	2,42
1,2	6,2	5,2	3,02	2,54

Para este modelo de 3 capas se estimó un espesor de sedimentos máximos de 6,2 km, siendo el disparo con el mayor espesor de sedimentos presentes entre los disparos de estudio sobre esta cuenca. Las primeras dos capas presentaron un espesor de 2,5 km cada una, mientras que la tercera capa presentó 1,2 km de espesor. La capa de sedimentos molásicos de baja densidad que data del Plioceno (primera capa) mantiene un espesor similar al de la capa de sedimentos medianamente consolidados del Mioceno (segunda capa), mientras que la capa de sedimentos consolidados de mayor densidad que datan del Cretácico (tercera capa) presenta bajos espesores con respecto a las demás capas. Todos estos espesores de capa son mayores que los observados en las demás capas de la cuenca Barinas-Apure.

Este incremento en los espesores de capa se debe a que este disparo se ubica al sur de la falla de Apure, donde existen mayores espesores de sedimentos. También hay que destacar que este disparo se ubica sobre un alto estructural que conlleva a profundidades de basamento menor (2 km aproximadamente). Donde el buzamiento del basamento y de las capas es hacia el sur.

Las velocidades de onda P y S registradas en este disparo fueron las menores, en comparación con los demás disparos. Esto se debe a los altos espesores de sedimentos que presenta esta región.

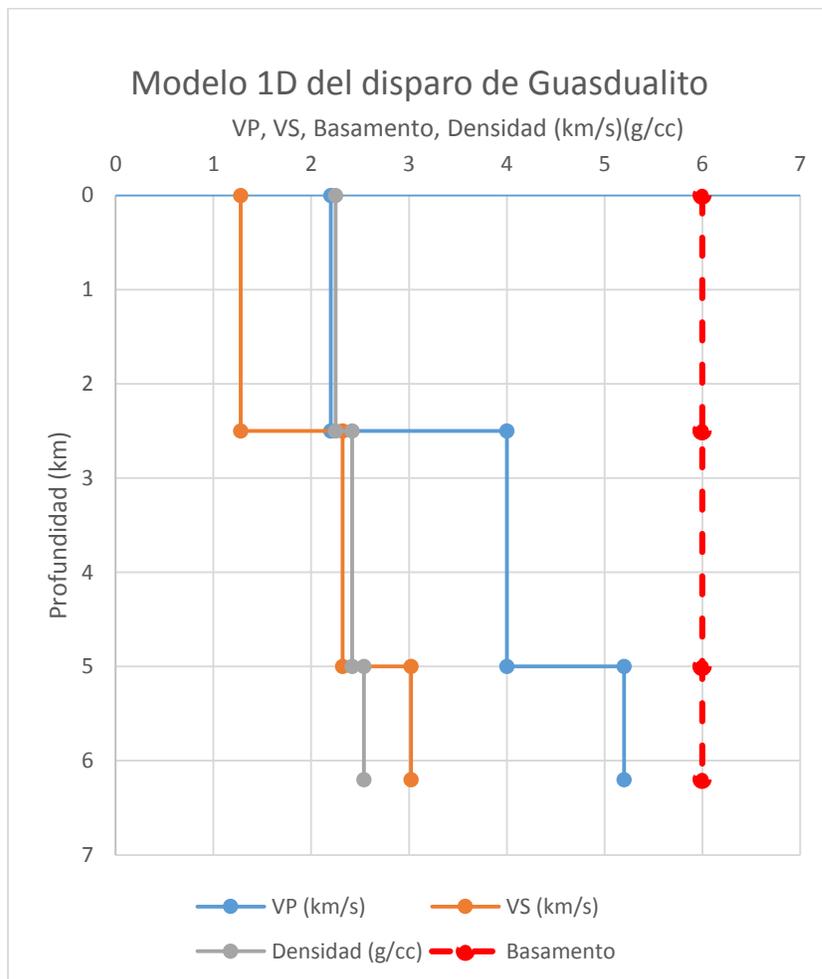


Figura 60. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de Guasualito.

### 5.3.2 Cuenca de Maracaibo

En la Tabla 25 se pueden observar parte de los valores promedios de entrada que fueron utilizados en las secciones sintéticas y los modelos 1D de los disparos correspondientes a la cuenca de Maracaibo. Se generó un modelo de tres capas en el que se calcularon las impedancias acústica de cada capa y el contraste de impedancia entre cada interfase.

Tabla 25. Valores promedio utilizados para la elaboración de los modelos 1D y las secciones sísmicas sintéticas correspondientes a la cuenca de Maracaibo.

Cuenca de Maracaibo									
Columna geológica	Formación	VP (km/s)	VS (km/s)	$\rho$ (g/cc)	Espesor (km)	Impedancia (km.g/s.cc)	Contraste de impedancia (km.g/s.cc)		
CENOZOICO	Qr	Holoceno	2,7	1,57	2,3	2	6,21	3,79	
		Pleistoceno							La Puerta
	Neógeno	Plioceno	4	2,32	2,5	3	10		
		Mioceno							Lagunillas
		Oligoceno							La Rosa
	Paleógeno	Eoceno	Icotea	4,9	2,84	2,55	4		12,495
			Paují						
Misoa									
Paleoceno	Guasare								
MESOZOICO	Cretácico	Superior	4,9	2,84	2,55	4	12,495	2,495	
		Mito Juan							
		Colon							
		La Luna							
		Inferior							
		Maraca							
Lisure									
Apón									
Rio Negro									

Con los valores mostrados en la Tabla 25 se generó un modelo 1D general de las velocidades de onda P y S y densidad con respecto a la profundidad de cada capa propuesto para el modelo de la cuenca de Maracaibo (Figura 61). Se puede observar que las velocidades de onda P y S y densidades aumentaban con respecto a la profundidad, debido a capas con sedimentos mejor consolidados. Se puede observar un aumento más relevante de las velocidades de onda P y S a partir de la segunda capa a 2 km de profundidad, donde están presentes los sedimentos que datan del Mioceno – Eoceno. Además de esto, se graficó en los modelos 1D la velocidad del basamento cristalino con 6 km/s. A modo de ubicar el basamento dentro de los modelos.

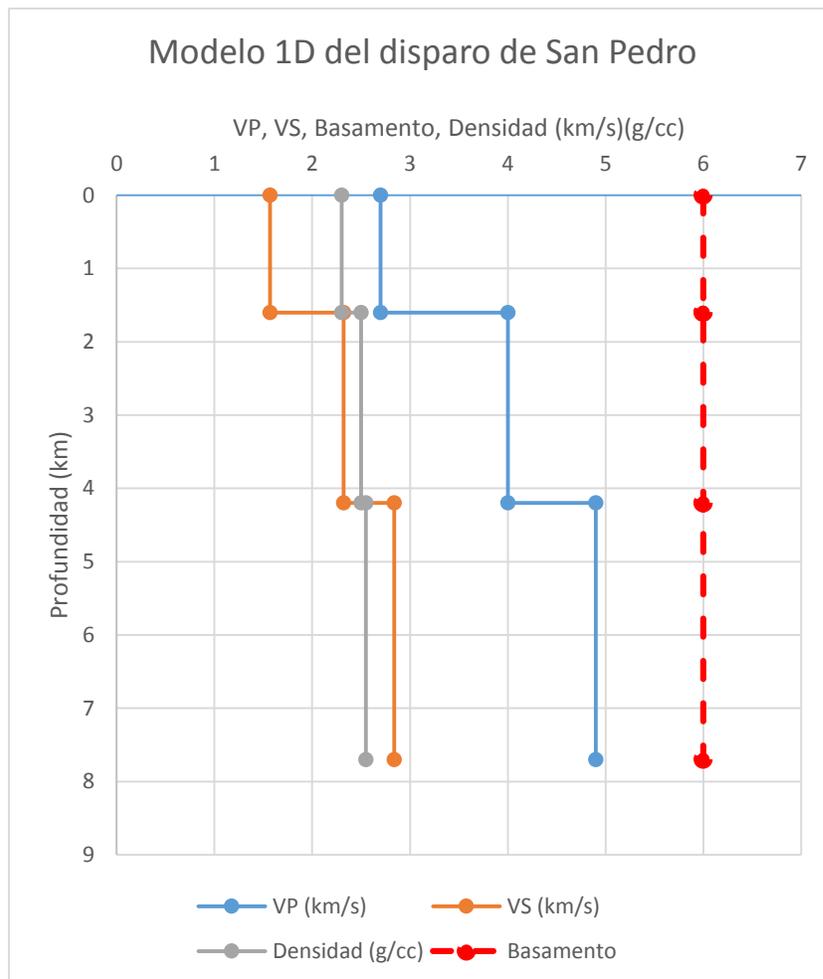


Figura 61. Modelo 1D general de la cuenca de Maracaibo con respecto a la profundidad de cada capa.

### 5.3.2.1 Disparo de Santa Bárbara del Zulia

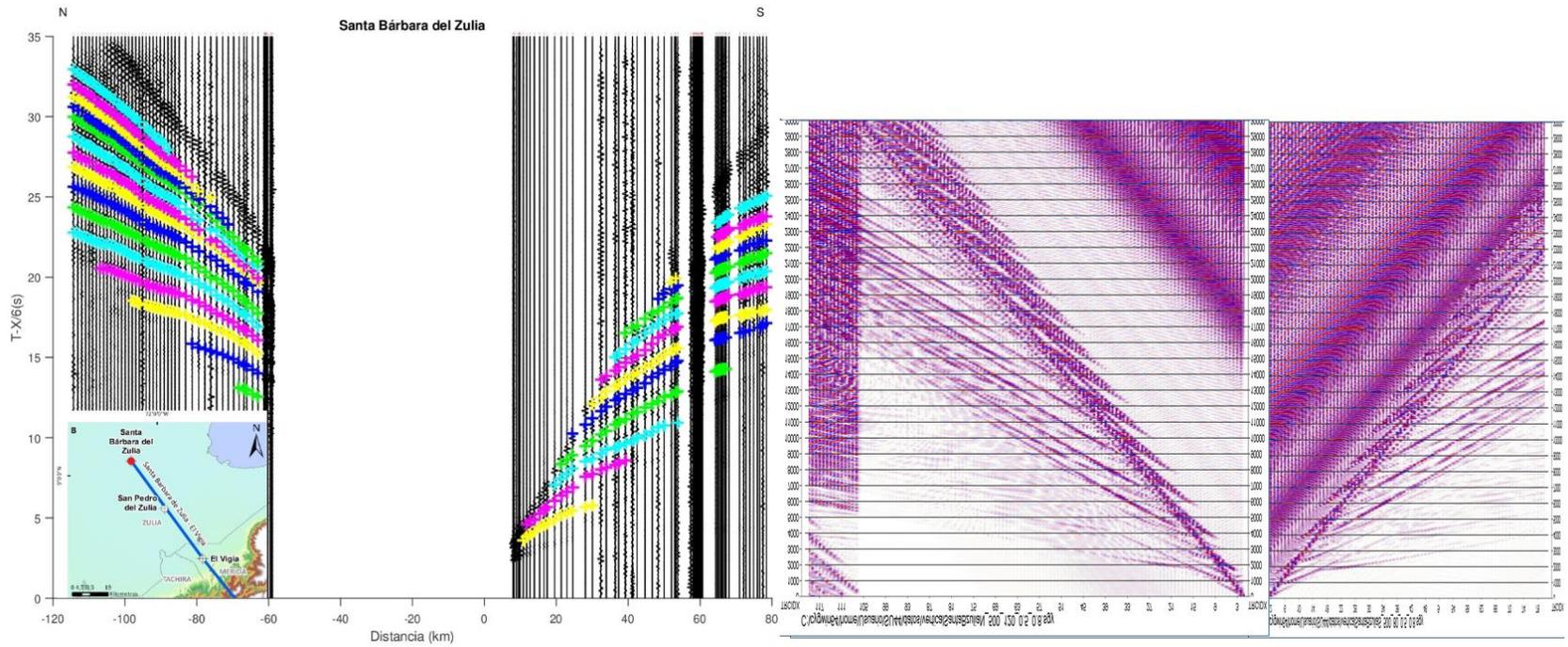


Figura 62. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de Santa Bárbara del Zulia.

Se compararon las secciones sísmicas del disparo de Santa Bárbara del Zulia (Figura 57). Debido a que en esta sección sísmica se observaron reverberaciones a ambos lados del disparo, se generaron dos secciones sísmicas sintéticas, al norte y al sur del disparo, ajustando sus distancias *offset* y trazas en el tiempo. Gracias a la sección sintética al norte del disparo, se pueden observar las primeras reverberaciones que no se pudieron seleccionar en la sección sísmica interpretada por falta de información en la zona (entre 0 y -60 km de distancia *offset*). Al igual que en las secciones sísmicas sintéticas de la cuenca Barinas-Apure, en esta también se pudo observar el efecto de las reverberaciones sobre la onda superficial. Se observa más ruido en la sección sísmica sintética al sur del disparo.

Una vez establecidos los parámetros de adquisición, se alteraron principalmente los espesores y velocidades de onda P y S (Tabla 23) hasta que el ángulo de la onda superficial y el de las reverberaciones de las secciones sísmicas fueran similares, para poder construir posteriormente el modelo 1D del disparo de Santa Bárbara del Zulia (Figura 58).

Tabla 26. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de Santa Bárbara del Zulia.

Santa Bárbara del Zulia				
Espesor (km)	Profundidad (km)	VP (km/s)	VS (km/s)	Densidad (g/cc)
1,2	1,2	2,8	1,62	2,3
2,3	3,5	4	2,32	2,5
3	6,5	4,9	2,84	2,55

Para este modelo de 3 capas se estimó un espesor de sedimentos máximos de 6,5 km, siendo el disparo con menor profundidad, con respecto a los demás disparos de esta cuenca. El espesor de la primera capa fue de 1,2 km, el de la segunda capa fue de 2,3 km, y la tercera, que llega hasta el tope del basamento, fue de 3 km de espesor. La capa de sedimentos poco consolidados de baja densidad que datan del Plioceno (primera capa) tiene un espesor delgado con respecto a las demás capas. La segunda capa, que representa sedimentos medianamente consolidados que datan del Eoceno,

tiene un espesor y densidad intermedia La tercera capa, que representa sedimentos más consolidados que datan del Cretácico con un mayor valor de densidad. Esta última presenta mayores espesores que las demás capas.

Se registraron altas velocidades de onda P y S en este disparo, debido a su litología mejor consolidada y a sus espesores de capa menores, en comparación a los otros disparos de este segmento.

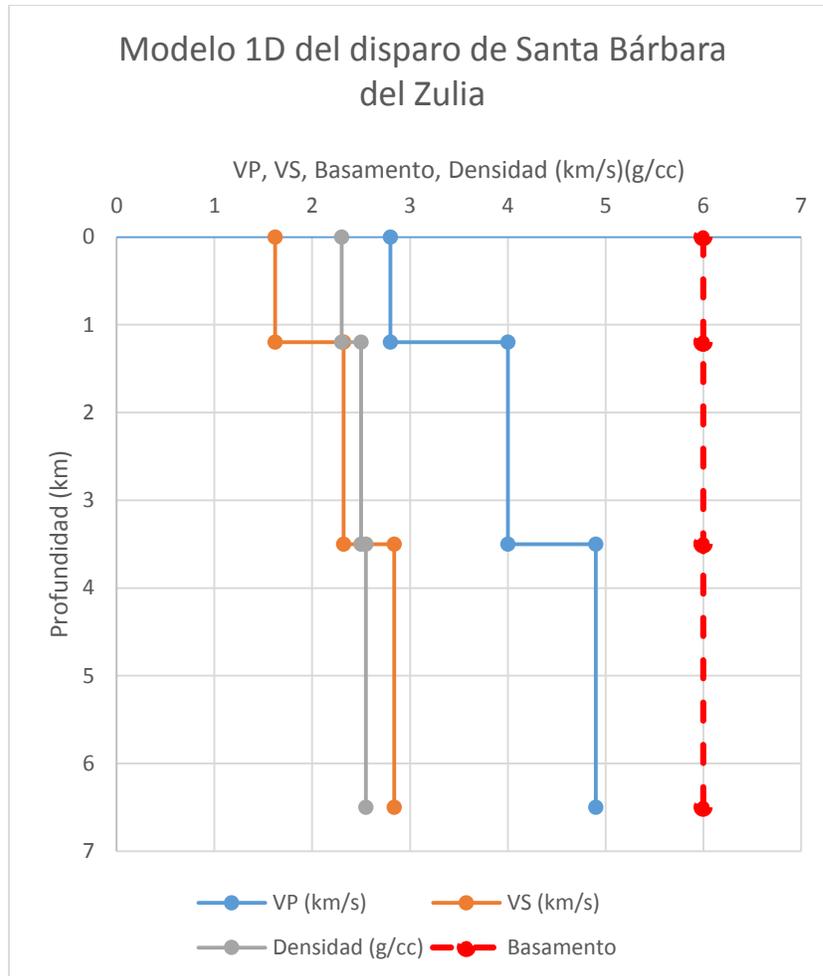


Figura 63. Modelos 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de Santa Bárbara del Zulia al norte y al sur.

### 5.3.2.2 Disparo de San Pedro

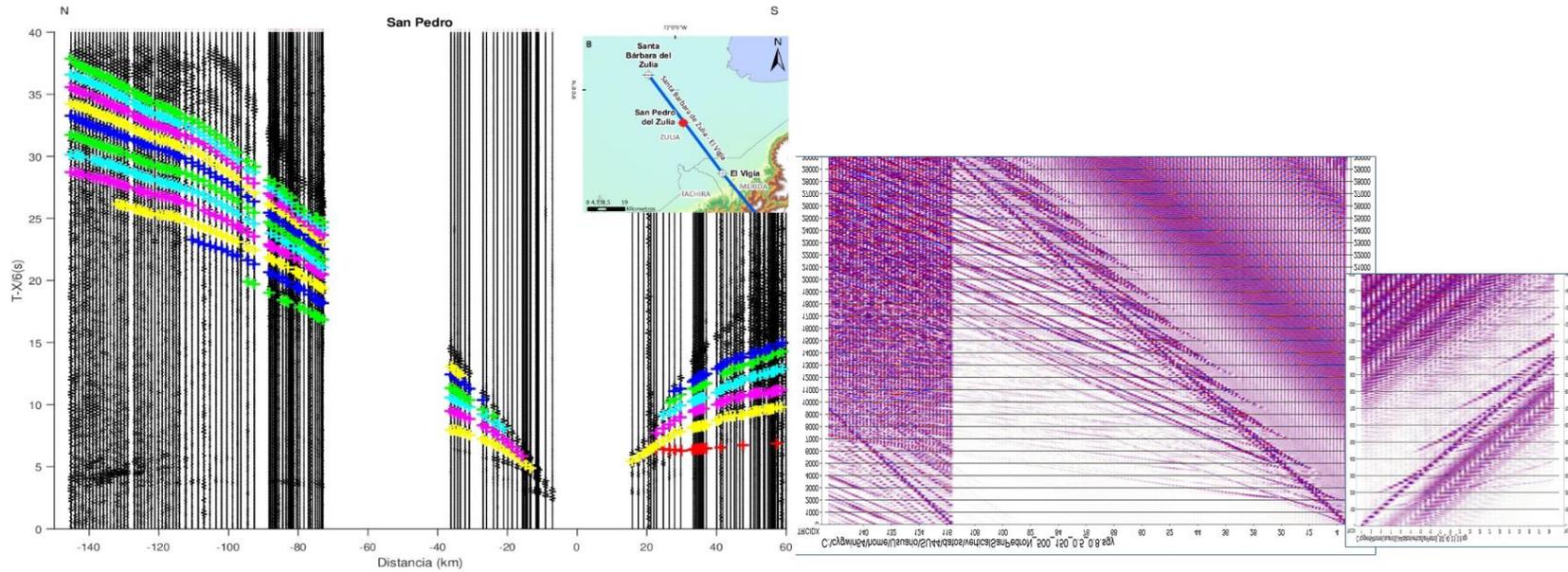


Figura 64. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de San Pedro.

Se compararon las secciones sísmicas del disparo de San Pedro (Figura 64). Debido a que en esta sección sísmica se observaron reverberaciones a ambos lados del disparo, se generaron dos secciones sísmicas sintéticas, al norte y al sur del disparo, ajustando sus distancias offset y trazas en el tiempo. En la sección sísmica sintética al norte del disparo se pudieron identificar las reverberaciones que se propagaron en esta dirección, sin embargo, esto fue un poco más complicado con las reverberaciones que se propagaron hacia el sur, debido a las pequeñas dimensiones de la sección sísmica sintética. Se pudo observar el efecto de las reverberaciones sobre la onda superficial en la sección sísmica sintética.

Una vez establecidos los parámetros de adquisición, se alteraron principalmente los espesores y velocidades de onda P y S (Tabla 27) hasta que el ángulo de la onda superficial y el de las reverberaciones de las secciones sísmicas fueran similares, para poder construir posteriormente el modelo 1D del disparo de San Pedro (Figura 65).

Tabla 27. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de San Pedro.

San Pedro				
Espesor (km)	Profundidad (km)	VP (km/s)	VS (km/s)	Densidad (g/cc)
1,6	1,6	2,7	1,57	2,3
2,6	4,2	4	2,32	2,5
3,5	7,7	4,9	2,84	2,55

Para este modelo de 3 capas se estimó una profundidad máxima de 7,7 km. El espesor de la primera capa fue de 1,6 km, el de la segunda capa fue de 2,6 km, y la tercera, que llega hasta el tope del basamento, fue de 3,5 km de espesor. La capa de sedimentos poco consolidados de baja densidad que datan del Plioceno (primera capa) mantiene un espesor delgado con respecto a las demás capas. La segunda capa, que representa sedimentos medianamente consolidados que datan del Eoceno, mantiene un espesor y densidad intermedia. La tercera capa, que representa sedimentos más consolidados que datan del Cretácico con un mayor valor de densidad. Esta última presenta mayores espesores que las demás capas. En

comparación a las capas del segmento anterior, se pudo observar un aumento progresivo en el espesor de todas las capas hacia el suroeste.

Se registraron menores velocidades de onda en comparación a las registradas en el disparo anterior. Esto se debe a un aumento en los espesores de sedimentos hacia el suroeste. Misma dirección en la que buza el basamento y las capas de esta cuenca.

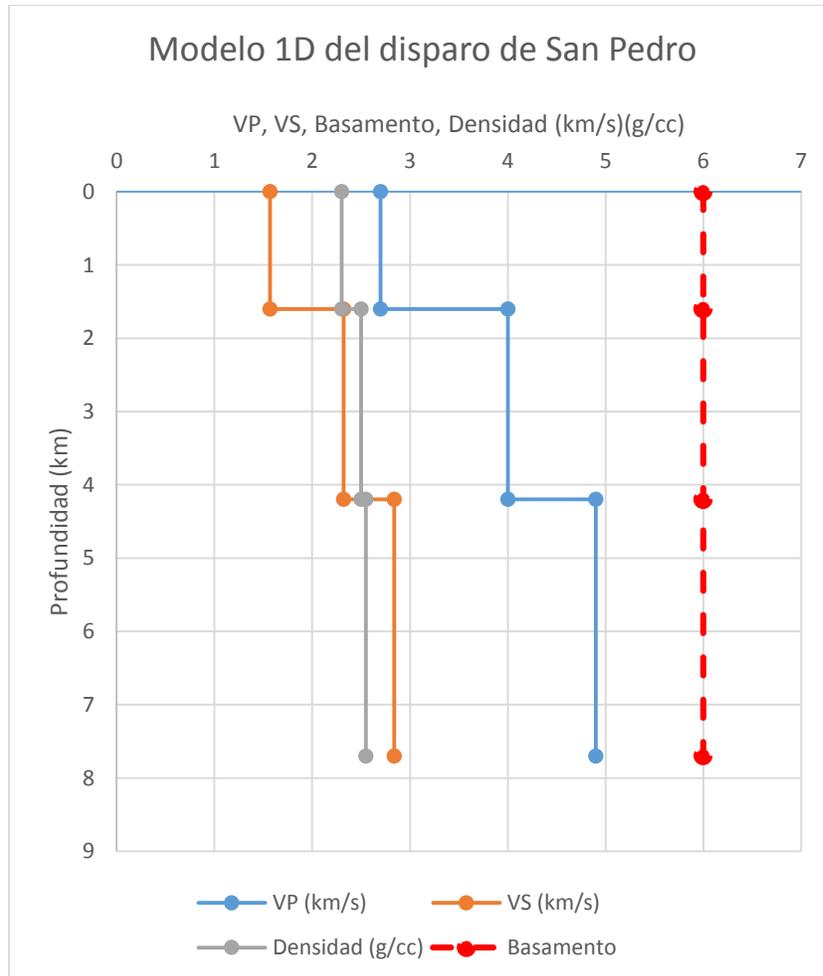


Figura 65. Modelos 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de San Pedro al norte y al sur.

### 5.3.2.3 Disparo de El Vigía

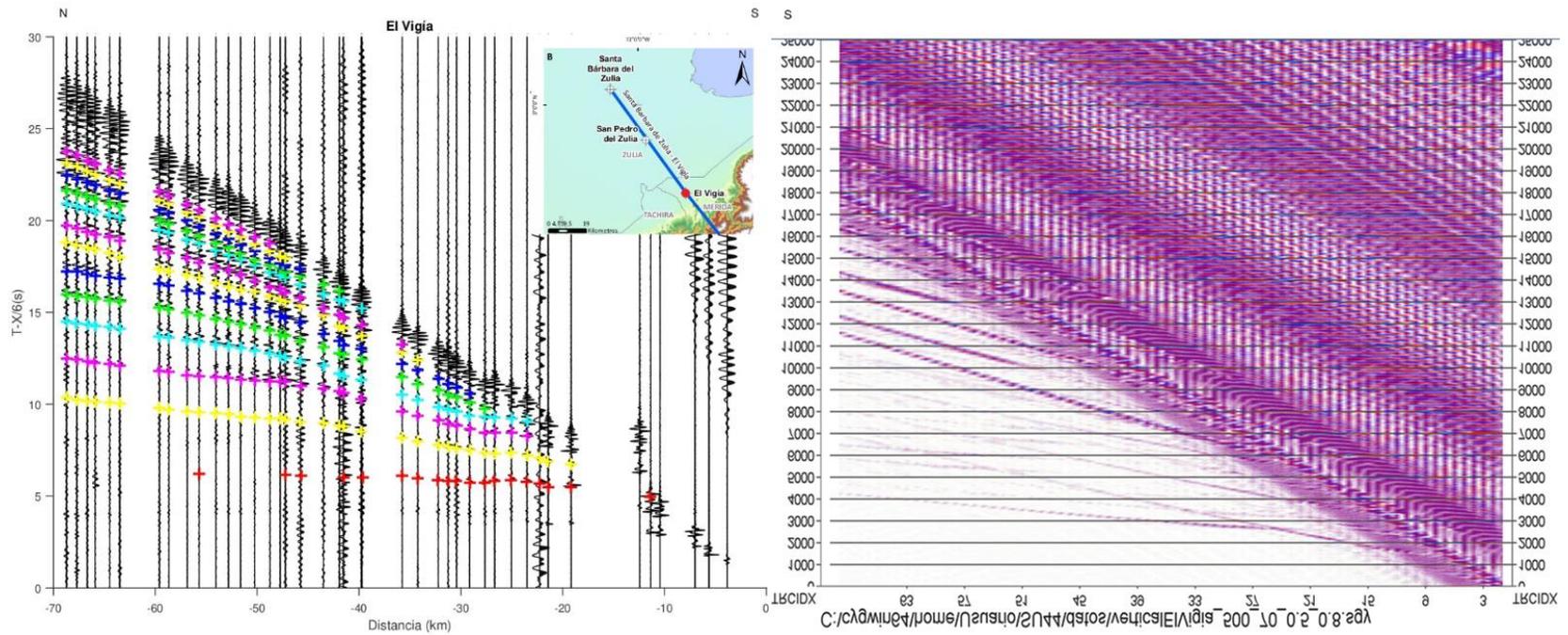


Figura 66. Comparación entre la sección sísmica con reverberaciones seleccionadas y la sección sísmica sintética en el disparo de El Vigía.

Se compararon las secciones sísmicas del disparo de El Vigía (Figura 66). Se pudo observar que hubo mucho ruido en esta sección sísmica. Esto puede estar motivado a las grandes profundidades en las que se encuentra su basamento y los altos contrastes de impedancia que hay en esta zona, que sufrió fuertes eventos de deformación al momento de la formación de la cordillera montañosa de los Andes de Mérida. Se pudieron identificar algunas reverberaciones que se observaron en la sección sísmica interpretada, mas sin embargo, la coincidencia en el ángulo de las ondas superficiales de ambas secciones fue lo que sirvió mas para dar con el modelo 1D de este disparo. Una vez establecidos los parámetros de adquisición, se alteraron principalmente los espesores y velocidades de onda P y S (Tabla 23) hasta que el ángulo de la onda superficial y el de las reverberaciones de las secciones sísmicas fueran similares, para poder construir posteriormente el modelo 1D del disparo de El Vigía (Figura 58).

Tabla 28. Valores utilizados para la sección sintética y modelo 1D en el disparo de El Vigía.

El Vigía				
Espesor (km)	Profundidad (km)	VP (km/s)	VS (km/s)	Densidad (g/cc)
2	2	2,6	1,51	2,3
3	5	4	2,32	2,5
4	9	4,9	2,84	2,55

Para este modelo de 3 capas se estimó una profundidad máxima de sedimentos de 9 km. Siendo esta zona la que presentó mayores profundidades de basamento alcanzado en este estudio. El espesor de la primera capa fue de 2 km, la segunda capa fue de 3 km, y la tercera, que llega hasta el tope del basamento, fue de 4 km. Al igual que en los disparos anteriores de esta cuenca, la capa de sedimentos poco consolidados de baja densidad que datan del Plioceno (primera capa) mantiene un espesor delgado con respecto a las demás capas. La segunda capa, que representa sedimentos medianamente consolidados que datan del Eoceno, mantiene un espesor y densidad intermedia. La tercera capa, que representa sedimentos más consolidados que datan del Cretácico con un mayor valor de densidad. Esta última presenta mayores

espesores que las demás capas. Si se comparan los espesores de capa a lo largo de este segmento, se puede observar un aumento progresivo en los espesores de capa hacia el suroeste.

Se registraron menores velocidades de onda P y S en este disparo. Esto puede estar motivado a mayores espesores de la capa de sedimentos.

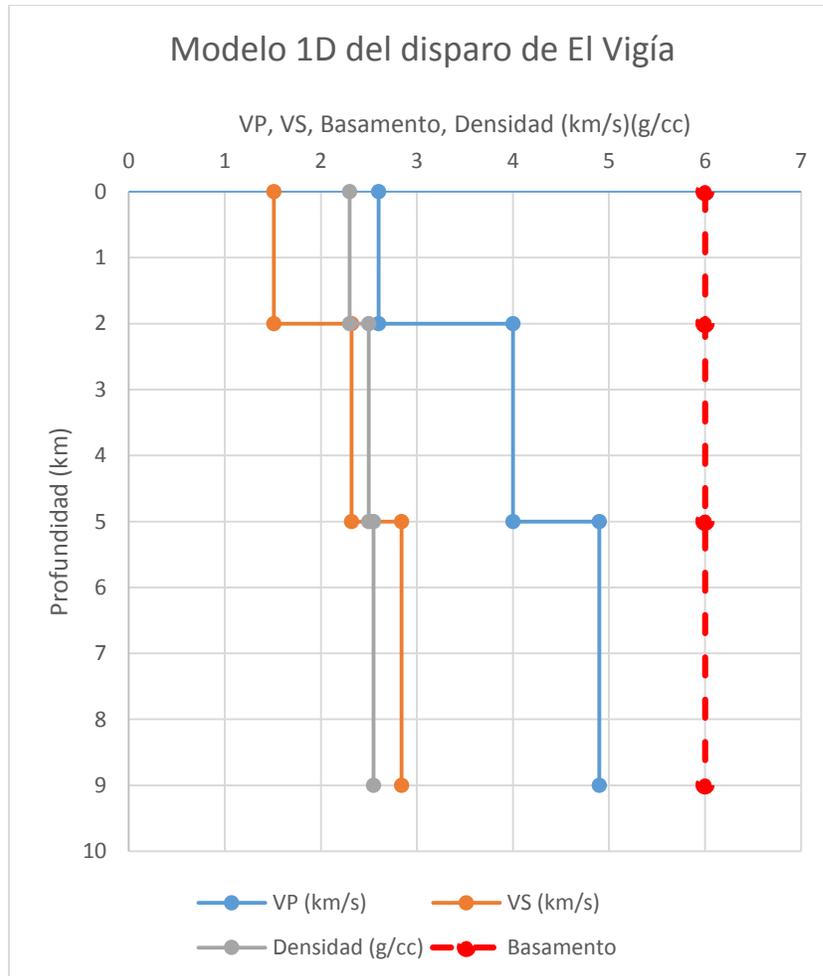


Figura 67. Modelo 1D de velocidades de onda P y S y densidades con respecto a las profundidades de capa del disparo de El Vigía.

#### **5.4 Comparación de las reverberaciones observadas en cada cuenca**

Las velocidades de onda P y S fueron mayores en la cuenca de Maracaibo que en la cuenca Barinas – Apure. Esto se debe a que la cuenca de Maracaibo presenta espesores de sedimentos mejor consolidados con valores más altos de densidad que en la cuenca Barinas – Apure. Y al comparar las velocidades de onda P y S entre los disparos de la misma cuenca, coinciden en que las velocidades son menores en aquellos disparos donde el espesor de sedimentos es mayor.

Al comparar las velocidades aparentes y cantidades de reverberaciones entre ambas cuencas, se puede notar que la cuenca de Maracaibo, registró mayores velocidades, pero menores cantidades de reverberaciones. Las velocidades aparentes mayores en la cuenca de Maracaibo se pueden deber a que los sedimentos presentes en esta cuenca están más consolidados. El número de reverberaciones es menor en la cuenca de Maracaibo debido a que el basamento de la cuenca Barinas-Apure presenta menores profundidades de basamento. Además de esto, se registró un mayor número de reverberaciones hacia las zonas que iban en sentido contrario al buzamiento del basamento. Esto se debe a que a medida que el buzamiento va disminuyendo su profundidad y las ondas se propagan en sentido contrario al buzamiento del mismo, el ángulo de incidencia del rayo (que debe ser igual al ángulo reflectante del rayo) va disminuyendo, permitiendo una mayor cantidad de múltiples reflexiones entre los 2 reflectores que, en este caso son la base de la primera capa de baja velocidad y tope del basamento de la cuenca (Figura 68). En esto también influye el buzamiento de la primera capa. Tomando como ejemplo la Figura 68, si la primera capa buzara hacia el sur también, entonces el número de reverberaciones aumentaría hacia el sur, pero disminuiría hacia el norte. Por lo tanto, en zonas donde exista buzamiento del basamento y/o la primera capa, habrá un mayor número de reverberaciones en las zonas donde haya un menor espesor sedimentario.

Esto se pudo observar principalmente en aquellos disparos donde las reverberaciones se propagaban a ambos sentidos de la fuente. Sin embargo, los disparos que presentaron un gran número de reverberaciones y que se propagaban hacia las zonas donde buzaba el basamento, como el caso de los disparos de Barinas y Río Apure,

esto podría estar asociado a que el buzamiento de la primera capa de baja velocidad sea en el mismo sentido (e incluso con mayor ángulo de buzamiento) que la del basamento.

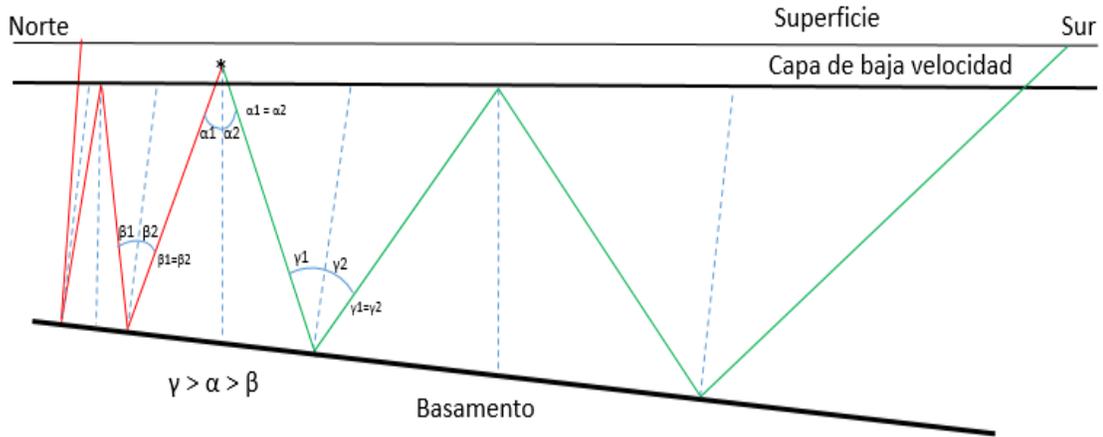


Figura 68. Representación de la trayectoria de una reverberación simple (asociada al paquete sedimentario) a ambos lados del disparo, entre un basamento con buzamiento hacia el sur y una capa de baja velocidad sin buzamiento. Línea roja: reverberación que se propaga hacia el norte. Línea verde: reverberación que se propaga hacia el sur. Línea azul punteada: línea normal imaginaria perpendicular a la base reflectante.

Se registran menores velocidades aparentes de las reverberaciones hacia las zonas donde el espesor sedimentario va disminuyendo y por lo tanto hay un mayor número reverberaciones observadas. Esto ocurre porque a medida que se van generando las múltiples reflexiones, estas van perdiendo velocidad.

En las reverberaciones asociadas a la fase Pg se pudieron observar de mejor manera en los disparos ubicados sobre la cuenca Barinas – Apure, mientras que los de la cuenca de Maracaibo se observan levemente por sus bajas amplitudes. Uno de los factores que puede involucrar esto, es la diferencia en la profundidad de sus basamentos. Este tipo de reverberación se ven claramente en la cuenca Barinas-Apure debido a que presenta profundidades de basamento menores y contrastes de impedancia más altos que en la cuenca de Maracaibo.

Ambas cuencas presentan una primera capa de bajas velocidades y a medida que estas capas aumentaban su espesor, las velocidades de onda P y S disminuían. En ambas cuencas se puede observar que, en la dirección en que buzaban sus basamentos y que aumentaban sus espesores de sedimentos, disminuían sus velocidades de onda P y S.

Al comparar el número de reverberaciones y los mapas cuantitativos de ambas cuencas, se puede observar que el número de reverberaciones en la cuenca Barinas – Apure fue mayor que en la cuenca de Maracaibo. Por lo tanto, el contraste de impedancia acústica fue mayor en la cuenca Barinas – Apure. Esto se puede observar en la cuenca de Maracaibo, donde existe un mayor número de reverberaciones hacia el noroeste, donde la tendencia de los espesores de capa disminuye mientras aumenta las velocidades de onda en esta dirección.

### **5.5 Condiciones que generan reverberaciones en cuencas sedimentarias**

Entre las condiciones necesarias que hacen falta para que se puedan generar reverberaciones en cuencas sedimentarias como las de Barinas – Apure y Maracaibo, está la presencia de un alto contraste de impedancia entre el basamento y el tope de la cuenca. De este modo cuanto mayor sea el contraste impedancia a través de una interfase, menor será la proporción de energía transmitida a través de esa interfase.

Además de esto, es necesario que la cuenca presente una o varias capas de baja velocidad entre el tope y la base de la misma. En el caso de las cuencas Barinas – Apure y Maracaibo, solo se observaron reverberaciones simples, que están relacionadas con una capa superficial de baja velocidad. De tal manera que los reflectores presentes en estas cuencas fueron la base de la primera capa y el tope del basamento. Esta capa de baja velocidad podría estar relacionada a la presencia de sedimentos recientes poco consolidados en ambas cuencas (Kenett B.L.N. con. Pers). También es importante mencionar la presencia de reverberaciones relacionadas con la fase Pg. Su presencia está vinculada principalmente con el contraste de impedancia y la profundidad del basamento. Por lo tanto, en el caso de las cuencas que presenten reverberaciones simples, para que se generen estas reverberaciones relacionadas a la fase Pg, es necesario que haya contrastes de impedancia altos y profundidades de basamento poco profundo.

En base a las condiciones anteriormente mencionadas, es importante acotar que los factores que rigen estas condiciones son: la magnitud de la fuente, la cual debe ser lo suficientemente potente para que el rayo sísmico pueda reflejarse múltiples veces. La

profundidad del basamento, la cual no debe ser tan profunda para que el tiempo de viaje de las múltiples reflexiones no sea tan extenso y pueda ser mejor observado en las secciones sísmicas. El buzamiento del basamento y de la primera capa, de tal manera que, si el buzamiento de ambas es en el mismo sentido, el número de reverberaciones será mayor. El tipo de litología, el cual debe ser sedimentos principalmente.

## CONCLUSIONES

En las secciones sísmicas de gran ángulo del proyecto denominado “Geociencia Integral de Los Andes de Mérida” (GIAME) en las cuencas de Barinas-Apure y Maracaibo se observan fuertes reverberaciones

La cuenca Barinas – Apure presentó en promedio un mayor número de reverberaciones (17,5) que la cuenca de Maracaibo (14,67). Se propone que el número de reverberaciones depende de diferentes factores, entre ellos puede estar el contraste de impedancia, la estratificación, la profundidad y el buzamiento de las estructuras. En el caso de la cuenca Barinas-Apure, esta presentó un mayor número de reverberaciones que la cuenca de Maracaibo debido a que esta presenta un mayor contraste de impedancia, un menor espesor sedimentario y menores profundidades de basamento.

Para ambas cuencas se elaboraron modelos 1D simplificados de velocidades a partir del análisis de las reverberaciones en las secciones sísmicas. Estos modelos fueron de 3 capas y representan la distribución de las velocidades de onda P y S y densidad en profundidad. La cuenca de Maracaibo presenta mayores espesores de sedimentos mejor consolidados y con mayor grado de densidad que la cuenca Barinas – Apure y, por lo tanto, presenta mayores velocidades de onda P y S.

Ambas cuencas presentan una primera capa de bajas velocidades. Se puede observar que a medida que esta capa aumenta su espesor, las velocidades de onda P y S disminuyen. En la dirección en que buzaban sus basamentos y que aumentaban sus espesores de sedimentos, también disminuían sus velocidades de onda P y S.

En la cuenca Barinas – Apure la primera capa está relacionada con espesores de 2 km de sedimentos molásicos poco consolidados que datan del Plioceno (estratos macizos de conglomerados, areniscas, limolitas y arcillitas). La segunda está relacionada con espesores de 2 km de sedimentos medianamente consolidados que datan del Mioceno (conglomerados, areniscas glauconíticas, limonitas y lodolitas). La tercera capa y que llega al basamento de la cuenca, está relacionada con espesores de 1 km de sedimentos bien consolidados que datan del Cretácico (areniscas micáceas,

glauconíticas, calcáreas, cuarzosas y limolíticas y lutitas silíceas, tripolíticas y calcáreas).

En la cuenca de Maracaibo la primera capa está relacionada con espesores de 2 km de sedimentos poco consolidados que datan del Plioceno (arcillas, arcillitas, limolitas, areniscas y lutitas). La segunda está relacionada con espesores de 3 km de sedimentos medianamente consolidados que datan del Eoceno (Lutitas, areniscas, limolitas y calizas). La tercera capa, que llega al basamento de la cuenca, está relacionada con espesores de 4 km de sedimentos bien consolidados que datan del Cretácico (areniscas, arcillas, lutitas, calizas, margas y dolomitas).

La cuenca de Maracaibo registró velocidades aparentes de reverberaciones mayores, que la cuenca Barinas-Apure. Se propone que a esto se debe la presencia de sedimentos más consolidados en la cuenca de Maracaibo.

Se pudo observar que, a medida que las reverberaciones se generan, estas presentan una menor velocidad que la previa. Esta disminución sucesiva de las velocidades podría estar siendo generada por la interacción con las ondas superficiales. Y debido a esto, se registraron menores velocidades de reverberaciones en las zonas donde el basamento era menos profundo.

En la cuenca Barinas – Apure se pudieron observar reverberaciones que estuvieran relacionadas con la fase Pg, sin embargo, estas no pudieron ser observadas en la cuenca de Maracaibo y en el disparo de Santa Bárbara de Barinas. Esto puede ser debido principalmente a la magnitud de la fuente y a la profundidad del basamento. Aunque las fuentes de adquisición empleadas en los disparos de la cuenca de Maracaibo y Santa Bárbara de Barinas fueron similares a los demás disparos, estos se ubicaron en zonas donde la profundidad del basamento era lo suficientemente profundo para que no pudieran ser generadas estas reverberaciones.

Entre las condiciones necesarias que se proponen que hacen falta para que se puedan generar reverberaciones en cuencas sedimentarias están: la presencia de un alto contraste de impedancia y una o varias capas de baja velocidad. Donde los factores que rigen estas condiciones son: la magnitud de la fuente, la profundidad del basamento, el buzamiento del basamento y de la capa de baja velocidad y la litología.

## RECOMENDACIONES

Al momento de aplicar un filtro en las secciones sísmicas en las que hay que reconocer distintas reverberaciones, es necesario utilizar un filtro de paso bajo que pueda disminuir el ruido sísmico que podría generar confusión en la etapa de interpretación, pero que permita la visualización de las reverberaciones.

Al utilizar el módulo de *Sureflpsvsh* de *Seismic Un\*x*, se recomienda utilizar un número de trazas en el tiempo inferior a 30000, debido a que presenta problemas al momento de querer utilizar la sección generada en el *software* de *SeiSee*.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arnaiz-Rodríguez, M. (2009). Modelado gravimétrico cortical de la zona noroccidental de Venezuela. Trabajo Especial de Grado no publicado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Arnaiz-Rodríguez, M. y Audemard F. (2014). Variations in elastic thickness and flexure of the Maracaibo block. *El Servier. Journal of South American Earth Sciences* 56 (2014) 251-264.
- Arnaiz-Rodríguez, M., Rodríguez-Millán, I. Audemard, F. (2011). Análisis gravimétrico y flexural del occidente de Venezuela. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(3), 420-438.
- Arnaiz-Rodríguez, M., Bezada, M., Schmitz, M. (2014). SEISPLOT: un código interactivo para mostrar y seleccionar las primeras llegadas en sismica de gran ángulo. *Jornadas de Investigación JIFI, UCV*, 8 pp. DOI: 10.13140/2.1.1833.8888
- Audemard, F.E., (1991), *Tectonics of Western Venezuela: Houston-Texas*, Rice University, tesis doctoral, 245 pp.
- Audemard, F.E., Audemard, F.A., (2002), *Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America–Caribbean geodynamic interaction: Tectonophysics*, 345, 299–327.
- Bezada, M. (2005). Modelado bidimensional de la corteza en la zona de colisión Caribe-Suramérica, región occidental de Venezuela (estados Falcón y Lara). Trabajo Especial de Grado no publicado. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- Brocher T.M., Fuis G. S., Fisher M.A., Plafker G., Moses M.J., Taber J.J. y Christensen N.I. (1994). Mapping the megathrust beneath the northern Gulf of Alaska using wide-angle seismic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99 (B6), 11663-11685. <https://doi.org/10.1029/94JB00111>
- Celis, S. (2017). Modelo Gravimétrico 3d De Los Andes De Mérida. Caracas, Venezuela, Universidad Simón Bolívar, Trabajo Especial de Grado.

- Chacín, L., Jácome, M.I., e Izarra, C. (2005). Flexural and gravity modelling of the Mérida Andes and Barinas-Apure basin, Western Venezuela. *Tectonophysics*, 405, 155-167.
- Duerto, L. (1998). Principales zonas triangulares del Occidente de Venezuela. Trabajo Especial de Grado de Maestría no publicada. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Erlich, R. y S. Barrett (1990). Cenozoic plate tectonic history of the northern Venezuela – Trinidad area. *Tectonics*, 9 (1): 161 – 184.
- Feo-Codecido, G., Smith, F., Aboud, N. y Di Giacomo, E. (1984). Basement and Paleozoic rocks of the Venezuelan Llanos basins. *Geological Society of America*, M. 162, pp. 175–187.
- Flores, L. (2015). Análisis De La Estructura Cortical Del Perfil De Sísmica De Gran Ángulo “Andes Norte”, Segmento Capatárida – Cabudare. Trabajo Especial de Grado no publicado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Gebrande, H. A. (1976). Seismic-Ray Tracing Method for Two-Dimensional Inhomogeneous Media. En: P. Giese, K. Prodehl y S. Stein (Eds.), *Explosion seismology in Central Europe, data and results*, Berlin: Springer, 162-167 p.
- GEOSOFT Oasis montaj (s.f). Montaj Geophysics How- To Guide. Obtenido el 9 de septiembre de 2018, de [http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/Applying\\_Filters\\_with\\_montaj\\_Geophysics.pdf](http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/Applying_Filters_with_montaj_Geophysics.pdf) .
- Gohl, K. y Uenzelmann-Neben, G. (2012). The Southeast African Large Igneous Province: a model of its crustal growth and plate-kinematic dispersal. *Large Igneous Provinces Commission. International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior*.
- Giese P.(1976a). Models of Crustal Structure and Main Wave Groups. En: Giese P., Prodehl K., Stein S. (Eds.), *Explosion Seismology in Central Europe, Data and Results*. Springer, Berlin, p.130-136.

- Giese, P. (1976b). Presentation of Record Sections. En: P. Giese, K. Prodehl y S. Stein (Eds.), Explosion seismology in Central Europe, data and results, Springer, Berlin. 113-114 p.
- González de Juana, C., J. Iturralde y X. Picard. (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Caracas: Ediciones Foninves, 1031 p.
- González, W. (2009). Interpretación del Basamento PreCretácico en las Cuencas Barinas – Apure y Oriental de Venezuela. Caracas, Venezuela, Universidad Simón Bolívar, Trabajo Especial de Grado de maestría.
- Kearey P., Brooks M. y Hill I. (2002). An Introduction to Geophysical Exploration. Oxford, England. Blackwell Science Ltd. 22-26 pp.
- Kennett, B. L. N. (2009). Seismic wave propagation in stratified media: Cambridge University Press.
- López, L. (2013). Análisis de sensibilidad para la determinación de offset lejano en la adquisición de datos sísmicos en la faja petrolífera del Orinoco. Trabajo Especial de Grado no publicado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Lowrie, W. (2007). Fundamentals of Geophysics. Cambridge, England. Cambridge University Press. 381 pp.
- Ma Y., Loures L. y Margrave G.F. (2004). Seismic modelling with the reflectivity method. CREWES Research Report, volumen 16, 7 pp.
- Mackenzie G.D., Thybo H. y Maguire P.K.H. (2005). Crustal velocity structure across the Main Ethiopian Rift: results from two-dimensional wide-angle seismic modelling. *Geophysical Journal International*, 162 (3), 994–1006, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02710.x>
- Makovsky Y., Klemperer S.L., Huang L., Lu D. y Project INDEPTH team (1996). Structural elements of the southern Tethyan Himalaya crust from wide-angle seismic data. *Tectonics*, 15 (5), 997 – 1005. <https://doi.org/10.1029/96TC00310>

- Medina, O. (2009). Estimación de Espesor elástico efectivo de la litosfera en zonas de Cuenca de Antepaís: Cuenca Barinas-Apure. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, Trabajo Especial de Grado de maestría, 236 pp.
- Medina, P. (2017). Modelado bidimensional de la corteza de los andes de Mérida en el perfil de reflexión andes sur, a partir de sísmica de refracción profunda. Caracas, Venezuela, Universidad Simón Bolívar, Trabajo Especial de Grado de maestría.
- Miyara, F. (2004). Filtros activos. 2da edición, Cátedra de Electrónica III. FCEIA - Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Argentina. 1-10 pp.
- Mjelde R., Digranes P., Shimamura H., Shiobara H., Kodaira S., Brekke H. Egebjerg T., Sørensen N y Shorbjørnsen S. (1998). Crustal structure of the northern part of the Vøring Basin, mid-Norway margin, from wide-angle seismic and gravity data. *Tectonophysics*. 293 (3-4), 175 – 205. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00090-0)
- Montilla L. (2015). Análisis de la estructura cortical del perfil de sísmica de gran ángulo “Andes Sur”, segmento Machiques-El Vigía. Trabajo Especial de Grado no publicado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central, Caracas, Venezuela.
- Morales, C. y Galves, M. (2014). Pasos para cambiar formato Texan a .SGY. Documento técnico interno no publicado. FUNVISIS, 6 p.
- Müller, G.(1985). The reflectivity method: a tutorial: *J. Geophys.*, 58, 153–174.
- Mussett A. y Khan M. (2000). *Looking into the Earth*. Cambridge, England. Cambridge University Press. 24-29 pp.
- Niu, F., Bravo, T., Pavlis, G., Vernon, F., Rendon, H., Bezada, M., Levander, A. (2007). Receiver function study of the crustal structure of the southeastern Caribbean plate boundary and Venezuela. *J. Geophys. Res.*, 112, B11308, doi:10.1029/2006JB004802.
- PDVSA EFAI (2006). Estudio integrado de la Cuenca de Maracaibo y Cuenca Barinas-Apure. Beicip-Franlab.

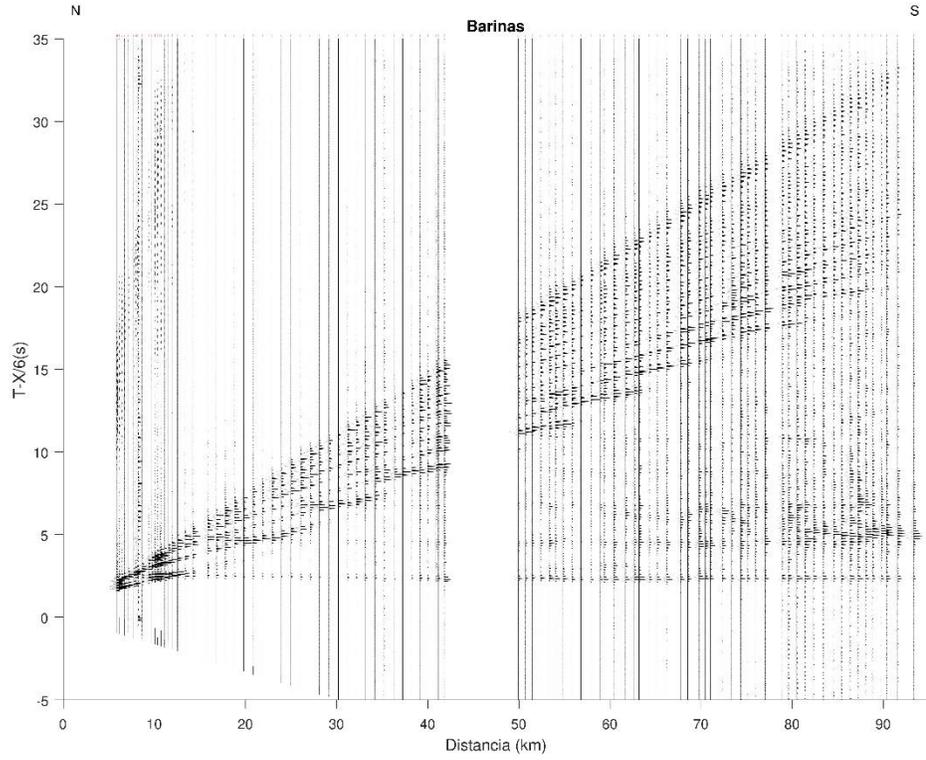
- Pinto, H. (2015). Modelado bidimensional de velocidades de ondas en la parte austral de los andes de Mérida. Caracas, Venezuela, Universidad Simón Bolívar, tesis de grado.
- Porras J., Castillo C., Machado V. y Chirinos N. (2007). Basamento en La Concepción, Cuenca de Maracaibo: oportunidad de explotación de un yacimiento no convencional. IX Congreso Geológico Venezolano. Caracas, Venezuela.
- Rivero E. (2016). Caracterización geofísica mediante estudios de ruido sísmico ambiental, en el este de la cuenca del lago de Maracaibo, edo. Zulia. Trabajo Especial de Grado no publicado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central, Caracas, Venezuela.
- Rodríguez, V. (2012). Optimización de parámetros de adquisición sísmica multicomponente utilizando modelado de reflectividades. Trabajo Especial de Grado no publicado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Rondón, F., Sánchez-Rojas J. y Rocabado V. (2016). Modelos gravimétrico cortical 2D de un perfil que cruza la sección sur de los Andes de Mérida. Jornadas de Investigación JIFI, UCV, 8 pp.
- Schmitz, M. (2016). Guía de Clases del Curso Sismología. Caracas: Universidad Simón Bolívar.
- Schmitz M., Avila J., Bezada M., Vieira E., Yáñez M., Levander A. Zelt, C.A., Jácome M.I. and Magnani M.B. (2008). Crustal thickness variations in Venezuela from deep seismic observations. *Tectonophysics*, 459, 14–26.
- Schmitz, M., Orihuela, N., Choy, J., Gil, E., Mazuera, F., Sánchez, J., Audemard, F., Arnaíz-Rodríguez, M., Reinoza, C., Araujo, F., Ritter, O., Levander, A., Niu, F., Ávila, J., García, K., Yegres, L., Cruces, J., Weckmann, U., Tietze, K., Cerrada, M., González, J., Barreto, G., Rendón, H., Bolívar, M., Molero, Y. y Lara, J. (2015). Investigaciones Geofísicas Integradas Para Estudiar La Estructura Litosférica De Los Andes De Mérida. *Sismología y Sismotectónica*. X CONVESIS 2015. Cumaná, Venezuela.

- Shearer, P. (2009). Introduction to seismology. 2nd edition. UK: Cambridge University Press. 409 pp.
- Tar buck, E. J., y Lutgens. F. K., (2005). Ciencias de la tierra. Madrid, España. Universidad Autónoma de Madrid, Publishedby Pearson Education. 341-371 pp.
- Telford, W., Geldart, L. y Sheriff, R. (1990). Applied geophysics Cambridge University Press. 136-280 pp.
- Yegres L. (2017). Modelado bidimensional de la corteza de Los Andes de Mérida en el perfil Andes Central, a partir de sísmica de refracción profunda. Tesis de Maestría no publicada. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Yoris, F. y Ostos, M. (1997). Geología de Venezuela: geología general y sus cuencas petrolíferas. WEC 1997. Schlumberger. Caracas, Venezuela. 44 pp.
- Zelt, C., y Ellis, R. (1988). Practical and Efficient Ray Tracing in Two-Dimensional Media for Rapid Traveltime and Amplitude Forward Modelling. Canadian Journal of Exploration Geophysics 24 (1), 16-31.
- Zelt, C., y Smith, R. (1992). Seismic Traveltime Inversion for 2-D Crustal Velocity Structure. Geophysical Journal International 108, 16-34.
- Zelt, C. (1999). Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic traveltime data. Geophysical Journal International, 139, 183–204, <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1999.00934.x>
- Zhao W., Mechie J., Brown L.D., Guo, J., Haines S., Hearn T., Klemperer S.L., Ma Y.S., Meissner R., Nelson K.D., Ni J.F., Pananont P., Rapine R., Ross A. y Saul J. (2001). Crustal structure of central Tibet as derived from project INDEPTH wide-angle seismic data. Geophysical Journal International, 145 (2), 486 – 498. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01402>.

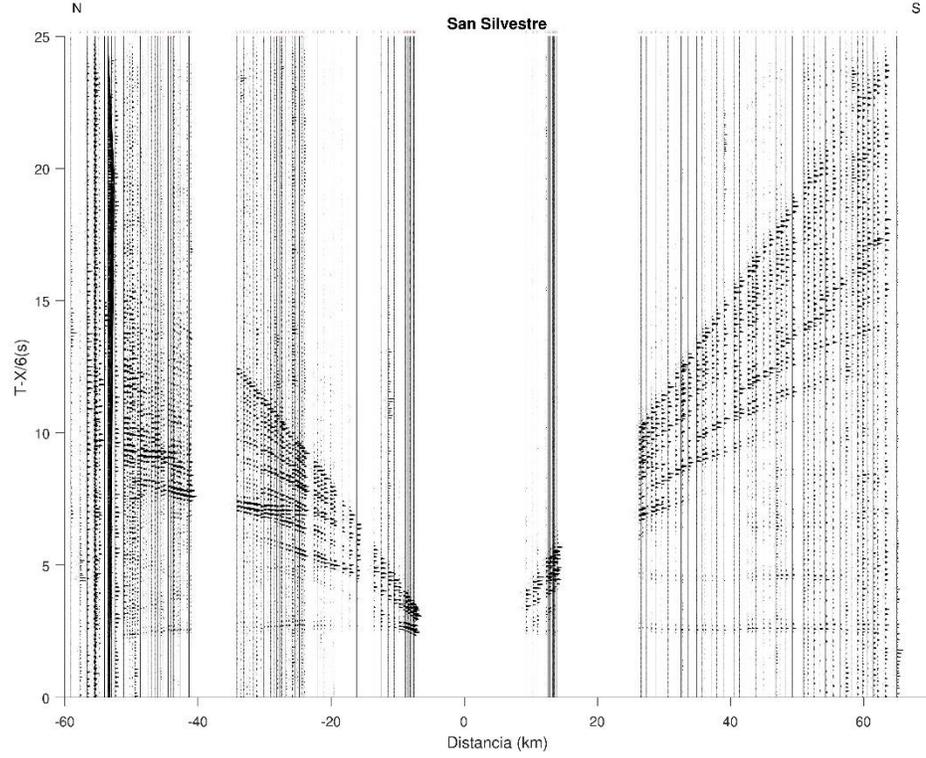
## ANEXOS

# Anexo A: Secciones sísmicas sin procesar

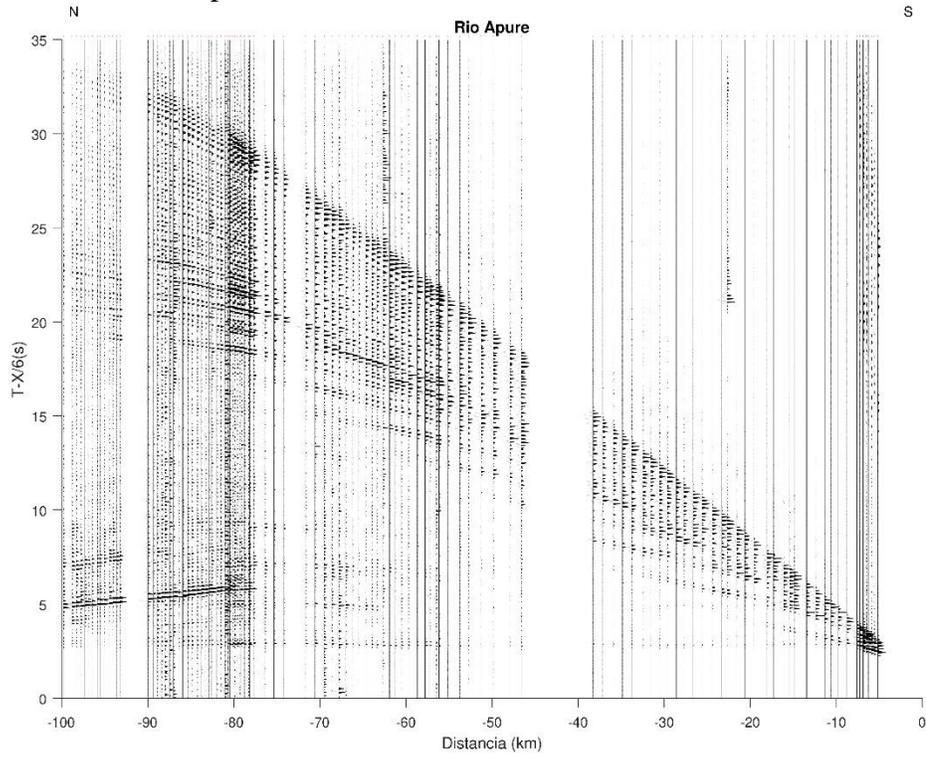
## Anexo 1. Barinas



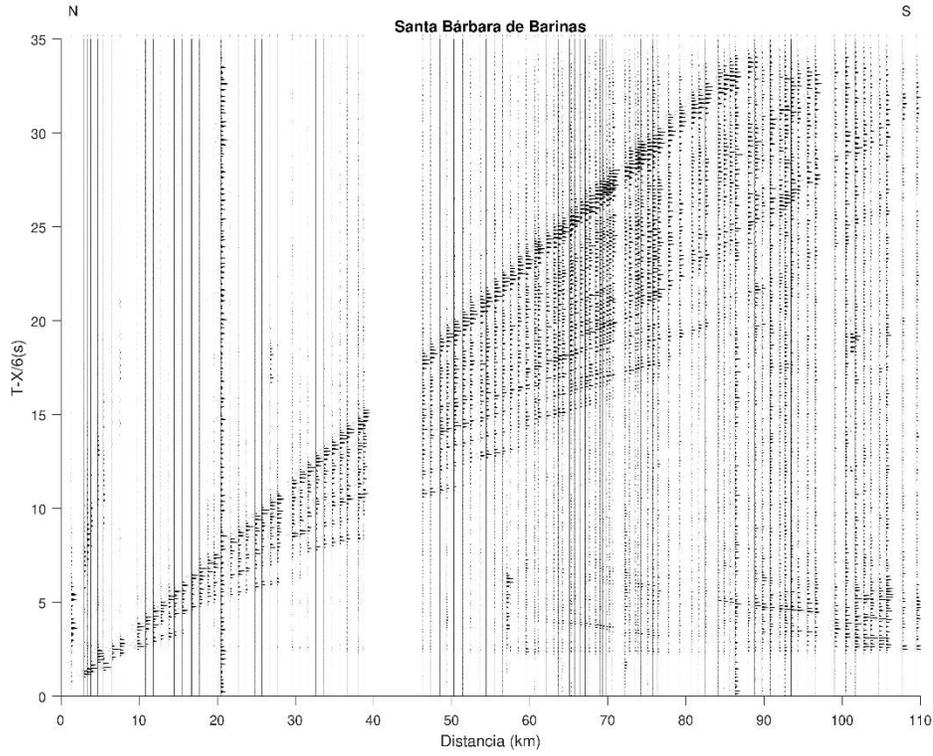
## Anexo 2. San Silvestre



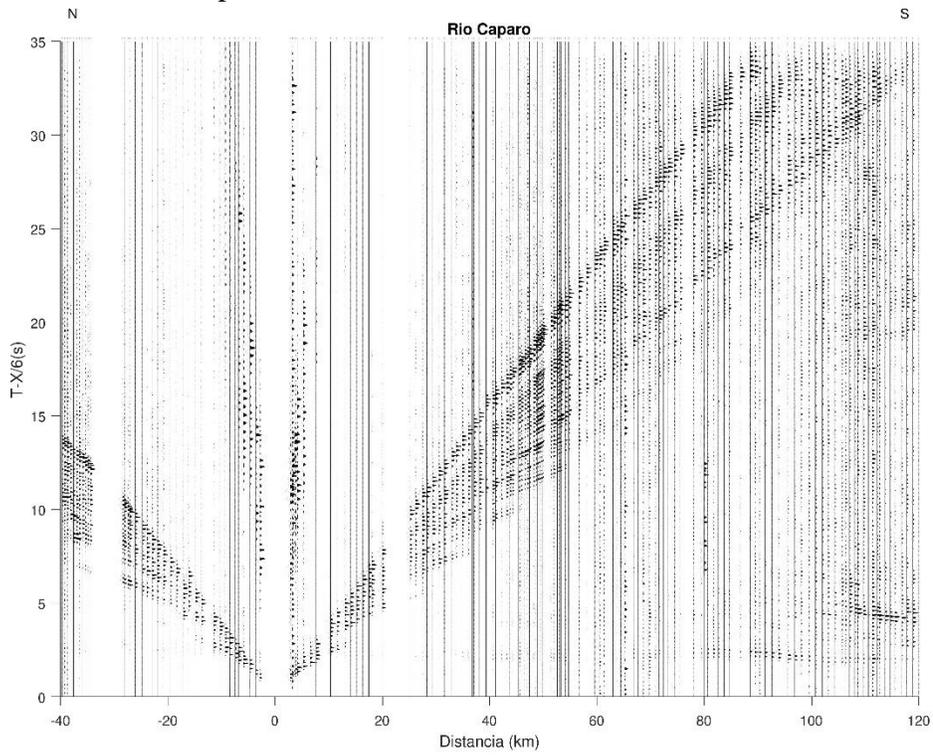
## Anexo 3. Río Apure



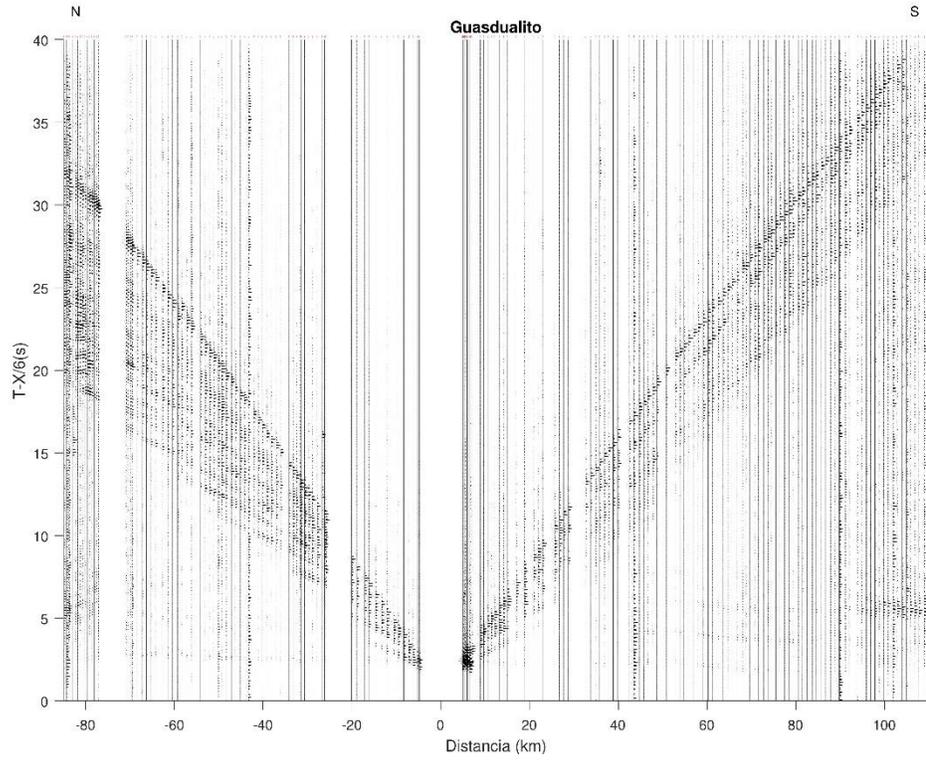
#### Anexo 4. Santa Bárbara de Barinas



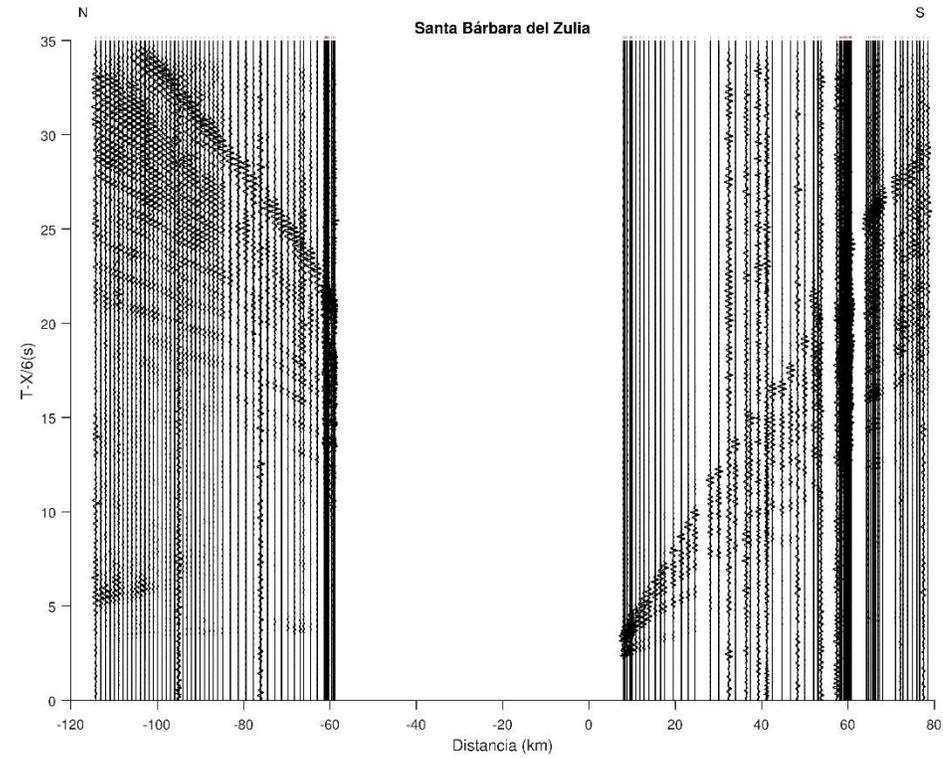
#### Anexo 5. Río Caparo.



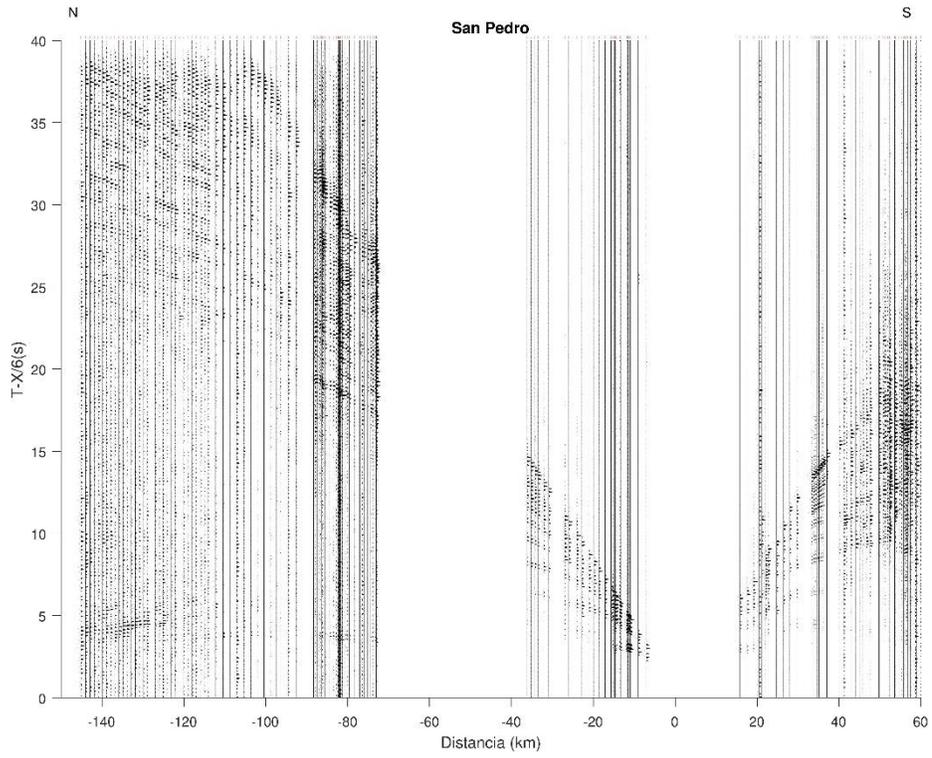
## Anexo 6. Guasualito



## Anexo 7. Santa Bárbara del Zulia.



### Anexo 8. San Pedro



### Anexo 9. El Vigía

